

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

CLARISSA DA COSTA FRANÇA

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DE BISHOP E DO MODELO SHALSTAB PARA
ESTIMATIVA DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A MOVIMENTOS DE MASSA NA BACIA
DO RIO FORQUILHAS – SÃO JOSÉ (SC)**

Florianópolis

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

CLARISSA DA COSTA FRANÇA

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DE BISHOP E DO MODELO SHALSTAB PARA
ESTIMATIVA DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A MOVIMENTOS DE MASSA NA BACIA
DO RIO FORQUILHAS – SÃO JOSÉ (SC)**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Curso de
Graduação de Engenharia Civil da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do Grau de Engenheiro Civil

Orientador: Prof. Dr. Rafael Augusto dos Reis Higashi

Florianópolis

2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

França, Clarissa da Costa
Aplicação do método de Bishop e do modelo SHALSTAB para
estimativa de áreas suscetíveis a movimentos de massa na
bacia do Rio Forquilhas - São José (SC) / Clarissa da
Costa França ; orientador, Rafael Augusto dos Reis Higashi,
2018.
94 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Deslizamento. 3. Mapa de
suscetibilidade. 4. Modelo SHALSTAB. 5. Método de Bishop.
I. Higashi, Rafael Augusto dos Reis. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil.
III. Título.

CLARISSA DA COSTA FRANÇA

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DE BISHOP E DO MODELO SHALSTAB PARA
ESTIMATIVA DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A MOVIMENTOS DE MASSA NA BACIA
DO RIO FORQUILHAS – SÃO JOSÉ (SC)**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado e aprovado, em sua forma final,
pelo Curso de Graduação de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 02 de agosto de 2018.

Profª. Luciana Rohde, Drª.

Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:



Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Civil Luiz Henrique Guesser, Me.

Coorientador

Departamento de Projetos de Arquitetura e Engenharia – UFSC

Prof. Orlando Martini de Oliveira, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Geógrafa Regiane Mara Sbroglia, Ma.

Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado à minha mãe Célia, à memória
de meu pai Adolfo, ao Davi e ao Parfait.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Célia e Adolfo, por acreditarem e confiarem que eu poderia ir mais longe.

Ao meu orientador, professor Dr. Rafael Augusto dos Reis Higashi, pela confiança, auxílio e orientação.

Ao Engenheiro Civil Luiz Henrique Guesser, pela sua coorientação, ajuda imensurável, disponibilidade e motivação, sem as quais este trabalho não teria sido possível de ser realizado.

Ao meu filho Davi, maior alegria e motivação da minha vida.

Ao meu marido Parfait, parceiro de faculdade, pelo carinho, apoio e incentivo, e por sempre achar que era possível.

Ao meu irmão Roberto e sua família, Alice, Samira e Matheus, por proporcionarem bons momentos quando reunidos.

Aos meus colegas de curso, que sempre me apoiaram e acreditaram, ajudando nos momentos difíceis.

A todos aqueles que, embora não tenham sido aqui mencionados, contribuíram de alguma forma na realização deste trabalho.

RESUMO

É notável a frequência de desastres naturais que ocorrem no Brasil, sendo os movimentos de massa um dos mais recorrentes. A região Sul do Brasil, em especial, devido às condições climáticas atuantes aliadas à geomorfologia da região, torna-se muito vulnerável aos deslizamentos. A ocupação de locais seguros em encostas é essencial para a segurança civil no processo de urbanização das cidades. Esta pesquisa se propôs a elaborar um mapa de suscetibilidade a deslizamentos da bacia do rio Forquilhas, localizada no município de São José/SC, a partir da união de mapas de suscetibilidade obtidos do modelo SHALSTAB e do método de Bishop. O mapa geotécnico pré-existente do município de São José utilizado nesta pesquisa foi elaborado por Laboratório de Mapeamento Geotécnico da Universidade Federal de Santa Catarina, na escala 1:10.000, utilizando a metodologia proposta por Regina Davison Dias. Este mapa geotécnico mostra um total de 12 unidades geotécnicas na bacia do rio Forquilhas, além de apresentar áreas com intervenções antrópicas, como aterros e áreas urbanizadas. A pesquisa elaborada por este Laboratório compreendeu, além do mapa geotécnico, a caracterização geomecânica dos solos que compõem o município de São José. O mapa das bacias hidrográficas do estado de Santa Catarina utilizado foi disponibilizado pela Epagri. O Modelo Digital do Terreno (MDT) do município de estudo foi cedido pelo Departamento de Geociências da UFSC, na escala 1:10.000, em consonância com o levantamento elaborado pela Secretaria do Desenvolvimento Sustentável. Através deste MDT foi possível gerar os mapas de curva de nível, declividades, direção de fluxo de chuvas e outros. Imagens de satélite provenientes dos *softwares* Google Earth e ArcGIS também foram utilizadas na pesquisa. Os dados e mapas foram editados com auxílio de *software* de sistema de informações geográficas, no caso ArcGIS. Gerou-se o mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos pelo modelo SHALSTAB – obtendo-se 89,11% da área da bacia com baixa suscetibilidade, 6,66% de área com média suscetibilidade e 4,24% de área da bacia com alta suscetibilidade – e o mapa de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais pelo método de Bishop – obtendo-se 69,90% da área da bacia com baixa suscetibilidade, 7,74% de área com média suscetibilidade e 22,36% de área da bacia com alta suscetibilidade. A partir da sobreposição dos mapas de suscetibilidade gerados, foi obtido o mapa de suscetibilidade a deslizamentos da bacia do rio Forquilhas. A sobreposição de cicatrizes de deslizamentos previamente mapeadas ao mapa resultante mostra que, cerca de 84% das cicatrizes encontram-se em áreas que apresentam predisposição a deslizamentos, percentual bastante significativo e que demonstra que os mapas gerados nesta pesquisa se aproximam da realidade que ocorre na bacia do rio Forquilhas.

Palavras-chave: Deslizamentos. Mapa de suscetibilidade. SHALSTAB. Bishop. Rio Forquilhas (SC).

ABSTRACT

It is considerable the frequency of natural disasters that occur in Brazil, with mass movement being one of the most recurrent. In particular, the South of Brazil due to its climate conditions allied to the region's geomorphology, it becomes very vulnerable to landslides. The occupation of safe places on slopes is essential for civil security on the cities urbanization process. This research proposed to elaborate a landslide susceptibility map of the Forquilhas river basin, located in São José City/SC, from the union of susceptibility maps obtained from SHALSTAB model and Bishop method. The pre-existing geotechnical map of the town of São José used in this research was elaborated by the Laboratório de Mapeamento Geotécnico from Universidade Federal de Santa Catarina, with the scale of 1:10.000, utilizing the methodology proposed by Regina Davison Dias. This geotechnical map shows 12 geotechnical units on the Forquilhas river basin, and it shows areas with anthropic interventions, such as landfills and urbanized areas. The research elaborated by Laboratório de Mapeamento Geotécnico included, besides the geotechnical map, the geomechanical characterization of the soils that make up the city of São José. The map of the basins of the state of Santa Catarina used was made available by Epagri. The Digital Terrain Model (DTM) of the city was provided by the Departamento de Geociências of UFSC, in the scale 1: 10,000. Through this MDT was possible to generate the level curve map, slopes map, direction of rainfall flow map and another. Satellite images from Google Earth and ArcGIS softwares were also used in the research. The susceptibility map to shallow translational landslides was generated by SHALSTAB model - obtaining 89.11% of the area of the basin with low susceptibility, 6.66% of area with average susceptibility and 4.24% of area of the basin with high susceptibility - and the susceptibility map to rotational landslides was generated by the Bishop method - obtaining 69.90% of the area of the basin with low susceptibility, 7.74% of area with average susceptibility and 22.36% of area of the basin with high susceptibility. From the overlapping of the susceptibility maps generated in this research, the map of susceptibility to landslides of the Forquilhas river basin was obtained. The overlapping of previously mapped sliding scars on the resulting map shows that about 84% of the scars are located in areas with predisposition to landslides, a very significant percentage, which shows that the maps generated in this research are close to the reality that occurs in the Forquilhas river basin.

Keywords: Landslides. Susceptibility map. SHALSTAB. Bishop. The Forquilhas River (SC).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Rastejo	22
Figura 2 - Esquema de deslizamento translacional raso	23
Figura 3 - Esquema de deslizamento circular	25
Figura 4 - Esquema de deslizamento em cunha	25
Figura 5 - Esquema de queda de blocos.....	26
Figura 6 - Esquema de corrida	27
Figura 7 - Modelo hidrológico de Estado Uniforme.....	31
Figura 8 – Localização da bacia do rio Forquilhas no município de São José	35
Figura 9 - Bacia do rio Forquilhas	36
Figura 10 - Mapa hipsométrico da bacia do rio Forquilhas	39
Figura 11 - Mapa geotécnico da bacia do rio Forquilhas.....	41
Figura 12 - Distribuição das unidades geotécnicas	42
Figura 13 - Fluxograma do método aplicado na pesquisa	51
Figura 14 - Mapa geotécnico do município de São José, SC.....	53
Figura 15 - Bacias hidrográficas de Santa Catarina.....	53
Figura 16 - Modelo Digital do Terreno da bacia do rio Forquilhas	55
Figura 17 - Mapa de declividades da bacia do rio Forquilhas	56
Figura 18 - Vetores de direção de fluxo (8 direções).....	58
Figura 19 - Esquema de fluxo de água em infinitas direções	58
Figura 20 - Dados necessários para processar a ferramenta ASA pela técnica de infinitas direções	59
Figura 21 - Discrepâncias que podem surgir na criação do MDT	59
Figura 22 - Modelo Digital de Elevações da bacia do rio Forquilhas.....	60
Figura 23 - Criação de uma superfície de acúmulo de fluxo a partir das direções de fluxo	62
Figura 24 - Mapa de Contribuição da bacia do rio Forquilhas	63
Figura 25 - Variação do ângulo da encosta e teste do Fator de Segurança.....	66
Figura 26 - Superfícies de ruptura traçadas no talude pelo software utilizando o método de Bishop	67
Figura 27 - Exemplo de correlação obtida entre a declividade do talude e o Fator de Segurança	68
Figura 28 - Identificação das cicatrizes de deslizamentos	69
Figura 29 - Exemplo de delimitação de cicatrizes de deslizamentos no ArcGIS	69
Figura 30 - Exemplo de cicatriz de deslizamento situada em área suscetível a deslizamentos	70
Figura 31 - Mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos da bacia do rio Forquilhas.....	71
Figura 32 - Distribuição espacial das classes de estabilidade.....	72
Figura 33 - Mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos da bacia do rio Forquilhas (padrão semafórico)	74
Figura 34 - Distribuição espacial das classes de estabilidade (padrão semafórico).....	75
Figura 35 - Variação de FS em função da declividade das encostas das unidades geotécnicas da bacia do rio Forquilhas.....	76
Figura 36 - Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais da bacia do rio Forquilhas (padrão semafórico)	80
Figura 37 - Distribuição espacial das classes de estabilidade.....	81
Figura 38 - Mapa de suscetibilidade a deslizamentos da bacia do rio Forquilhas (padrão semafórico).....	83
Figura 39 – Distribuição espacial das classes de estabilidade	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos movimentos de massa segundo Varnes (1978)	18
Quadro 2 - Classificação dos movimentos de massa segundo Augusto Filho (1992).....	19
Quadro 3 - Classificação e Codificação Brasileira de Desastres – COBRADE (2012)	21
Quadro 4 - Classes de estabilidade segundo o modelo SHALSTAB	32
Quadro 5 - Classes de estabilidade em função da razão a/b e $\tan\theta$	33
Quadro 6 - Abrangência das unidades geotécnicas da área de estudo.....	40
Quadro 7 - Classes de relevo baseado no Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos	54
Quadro 8 - Parâmetros de caracterização e de resistência dos solos da bacia do rio Forquilhas	61
Quadro 9 - Fatores de Segurança mínimos para deslizamentos	64
Quadro 10 - Nível de segurança desejado contra perdas de vidas humanas	64
Quadro 11 - Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais	65
Quadro 12 - Divisão das classes de estabilidade segundo o modelo SHALSTAB e sua representação	72
Quadro 13 - Equivalência entre os sistemas de classificação de suscetibilidade: padrões de representação	73
Quadro 14 - Declividade das encostas das unidades geotécnicas para cada classe de suscetibilidade	78
Quadro 15 - Hierarquia utilizada na definição da classe de suscetibilidade	82
Quadro 16 - Distribuição das cicatrizes de deslizamentos no mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos	84
Quadro 17 - Distribuição das cicatrizes de deslizamentos no mapa de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais	85
Quadro 18 - Distribuição das cicatrizes de deslizamentos no mapa de suscetibilidade a deslizamentos (translacionais rasos e rotacionais)	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CENAD – Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres

COBRADE – Classificação e Codificação Brasileira de Desastres

CRED – Centro para Pesquisas sobre Epidemiologia de Desastres

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EM-DAT – *The international disasters database – Emergency Events Database*

Epagri – Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina

FIDE – Formulário de Identificação de Desastres

IAEG – *International Association of Engineering Geology*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

LAMGEO – Laboratório de Mapeamento Geotécnico da Universidade Federal de Santa Catarina

MDT – Modelo Digital do Terreno

OMS – Organização Mundial da Saúde

ONU – Organização das Nações Unidas

SDS – Secretaria do Desenvolvimento Sustentável

SEDEC – Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil

SHALSTAB – *Shallow Landslide Stability Analysis*

TauDEM - *Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVO GERAL	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	MOVIMENTOS DE MASSA	17
2.1.1	Definição	17
2.1.2	Classificação dos Movimentos de Massa.....	17
2.1.2.1	Rastejos.....	22
2.1.2.2	Deslizamentos.....	22
2.1.2.3	Quedas	26
2.1.2.4	Corridas	26
2.2	MÉTODOS DE ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES	27
2.2.1	Método de Fellenius.....	28
2.2.2	Método de Bishop Simplificado	28
2.2.3	Modelo SHALSTAB	29
2.2.3.1	Modelo de estabilidade de encosta infinita.....	29
2.2.3.2	Modelo hidrológico de Estado Uniforme	30
2.2.3.3	Combinação entre o modelo de estabilidade de encosta e o modelo hidrológico.....	31
2.2.3.4	Aplicação do modelo SHALSTAB no Brasil	33
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	35
3.1	CLIMA E COBERTURA DO SOLO.....	37
3.2	HIDROGRAFIA.....	37
3.3	GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA.....	38
3.4	MAPA GEOTÉCNICO DA BACIA DO RIO FORQUILHAS	40
3.4.1	Descrição das Unidades Geotécnicas Presentes na Bacia do Rio Forquilhas	42
4	MATERIAIS E MÉTODOS	51
4.1	OBTENÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS	52
4.1.1	Transferência dos Arquivos para Ambiente SIG.....	54
4.2	MAPA DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS.....	57
4.2.1	Mapa gerado pelo Modelo SHALSTAB	57
4.2.2	Mapa gerado pelo Modelo Bishop.....	64
4.3	AFERIÇÃO DOS MAPAS DE SUSCETIBILIDADE	68
5	RESULTADOS E ANÁLISES.....	71
5.1	MAPA DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS TRANSLACIONAIS RASOS	71
5.2	MAPA DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS ROTACIONAIS.....	75
5.3	MAPA DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS.....	81
5.4	AFERIÇÃO DOS MAPAS DE SUSCETIBILIDADE	84
6	CONCLUSÕES.....	87

6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	89
	REFERÊNCIAS	91

1 INTRODUÇÃO

Com o crescente desenvolvimento físico das cidades e o aumento populacional vivenciado nas últimas décadas, cresce também a importância de conhecer o solo onde estão se consolidando as cidades. No âmbito da Engenharia Civil, as informações acerca do solo são fundamentais para uma boa prática da engenharia, seja ela na área de Estruturas, Infraestruturas ou Geotecnia, entre outras.

O Brasil, de acordo com Guimarães *et al.* (2008), em consequência das condições climáticas, com intensas chuvas de verão, e geomorfológicas, com maciços montanhosos de alta declividade, está muito vulnerável à ocorrência dos movimentos de massa. Souza *et al.* (2009) afirma que os movimentos têm mais frequência nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste. Os movimentos de massa são fenômenos naturais, caracterizados pelo movimento de descida de solos e rochas sob o efeito da gravidade, muitas vezes potencializado pela ação da água. Quando a ocorrência desses movimentos de massa se dá em áreas urbanas, as perdas socioeconômicas são muito elevadas. Além do mecanismo natural, a ação antrópica nas encostas como, desmatamento, modificações na drenagem de encostas, cortes em taludes sem orientação técnica necessária, depósitos de lixo, etc, tem tornado os solos brasileiros muito mais propensos à ocorrência dos movimentos de massa. E com a escassez de terrenos em áreas de baixa declividade, é impulsionada a ocupação das encostas localizadas nas áreas urbanas. Dessa forma, planejar o uso e ocupação dos solos urbanos é imprescindível para o crescimento saudável das cidades.

Assim, é necessário que sejam realizadas investigações acerca da estabilidade dessas regiões com o intuito de determinar quais podem ser ocupadas e quais devem ser evitadas. Nesse sentido, os métodos de análise de estabilidade de encostas se mostram uma ferramenta muito importante para a garantia da segurança das áreas urbanas. Com o avanço da taxa de crescimento populacional surge a necessidade de os métodos de análise serem mais rápidos, eficientes e econômicos.

O presente trabalho irá aplicar dois métodos de análise de estabilidade: o Método de Bishop, para deslizamentos rotacionais, e o modelo SHALSTAB (*Shallow Landslide Stability Analysis*), para deslizamentos translacionais rasos, em uma mesma bacia a fim de comparar os resultados obtidos por cada método com as cicatrizes existentes na bacia do rio Forquilha.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho consiste na elaboração do mapa de suscetibilidade a deslizamentos da bacia do rio Forquilhas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo principal desta pesquisa, será necessário alcançar alguns objetivos específicos. São eles:

- Caracterizar a bacia hidrográfica do Rio Forquilhas;
- Identificar as cicatrizes de deslizamentos de encostas localizadas na bacia do rio Forquilhas;
- Gerar mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos da bacia do rio Forquilhas pelo modelo SHALSTAB;
- Gerar mapa de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais da bacia do rio Forquilhas pelo método de Bishop;
- Unificar os mapas de suscetibilidade a deslizamentos elaborados a partir dos dois métodos utilizados;
- Comparar os mapas de suscetibilidade gerados nesta pesquisa com as cicatrizes de deslizamentos mapeadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão tratados os fundamentos teóricos necessários para o embasamento e entendimento do trabalho. Os assuntos abordados serão divididos na seguinte sequência: movimentos de massa e métodos de análise da estabilidade de taludes.

2.1 MOVIMENTOS DE MASSA

É indiscutível que os movimentos de massa têm sido objeto de estudos de engenheiros, geólogos e demais profissionais da área geotécnica em diversos países, tanto pela sua importância como agente modelador do relevo, quanto pela importância do ponto de vista socioeconômico. Assim, naturalmente, o conceito de movimento de massa possui variadas definições, além de diversos sistemas de classificações propostas por inúmeros autores.

2.1.1 Definição

De acordo com Gerscovich (2016), os movimentos de massa podem ser entendidos como qualquer deslocamento de solo e geralmente são associados a problemas de instabilidade de encostas. Guidicini e Nieble (1983) definem os movimentos de massa como movimentos globais de solos e de rochas. Uma definição mais ampla é a seguinte:

Movimento de massa é o movimento do solo, rocha e/ou vegetação ao longo da vertente sob a ação direta da gravidade. A contribuição de outro meio, como água ou gelo se dá pela redução da resistência dos materiais de vertente e/ou pela indução do comportamento plástico e fluido dos solos (SOUZA *et al*, 2009, p. 25).

2.1.2 Classificação dos Movimentos de Massa

As diversas classificações de diferentes autores, segundo Fernandes e Amaral (1996), surgiram da grande variedade de materiais, processos e fatores condicionantes envolvidos nos movimentos de massa. Algumas classificações abordam os movimentos de maneira simplificada, considerando somente uma característica, como a profundidade do movimento ou somente a velocidade do movimento.

Algumas das classificações internacionais que se destacaram foram a de Sharpe (1938), Varnes (1978) e Hutchinson (1988). Esta última é uma das propostas mais complexas para os

movimentos de massa, e a classificação apresentada por Varnes (1978) é a classificação oficial adotada pela *International Association of Engineering Geology* – IAEG, sendo uma das mais utilizadas internacionalmente, que se baseia no tipo de movimento e tipo de material, conforme mostrado no Quadro 1. No Brasil, as classificações que se destacam são a de Freire (1965), Guidicini e Nieble (1983) e IPT (1991). A classificação proposta por Augusto Filho (1992), exposta no Quadro 2, ainda é uma das mais difundida no país para a elaboração de mapas de risco, pois é uma revisão da proposta de Varnes (1978) ajustada para as características dos principais movimentos da dinâmica ambiental brasileira, levando em consideração características dos movimentos como materiais, velocidades e geometria mobilizada.

Quadro 1 - Classificação dos movimentos de massa segundo Varnes (1978)

Tipo de Movimento			Tipo de Material		
			Rocha	Solo (Engenharia)	
				Grosseiro	Fino
Quedas			De rocha	De detritos	De terra
Tombamentos			De rocha	De detritos	De terra
Escorregamento	Rotacional	Poucas unidades	Abatimento de rocha De blocos rochosos De rocha	Abatimento de detritos	Abatimento de terra
	Translacional	Muitas unidades		De blocos de detritos De detritos	De blocos de terra De terra
Expansões laterais			De rocha	De detritos	De terra
Corridas/Escoamentos			De rocha (rastejo profundo)	De detritos	De terra
				(Rastejo de solo)	
Complexos: combinação de dois ou mais dos principais tipos de movimentos					

Fonte: Varnes (1978 *apud* Gerscovich, 2016)

Quadro 2 - Classificação dos movimentos de massa segundo Augusto Filho (1992)

Processos	Características do movimento, material e geometria
Rastejo ou fluência	<p>Vários planos de deslocamento (internos)</p> <p>Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade</p> <p>Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes</p> <p>Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada</p> <p>Geometria indefinida</p>
Escorregamento	<p>Poucos planos de deslocamento (externos)</p> <p>Velocidades médias (km/h) a altas (m/s)</p> <p>Pequenos a grandes volumes de material</p> <p>Geometria e materiais variáveis</p> <p>Planares – solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza</p> <p>Circulares – solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas</p> <p>Em cunha – solos e rochas com dois planos de fraqueza</p>
Queda	<p>Sem plano de deslocamento</p> <p>Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado</p> <p>Velocidades muito altas (vários m/s)</p> <p>Material rochoso</p> <p>Pequenos a médios volumes</p> <p>Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc.</p> <p>Rolamento de matacão</p> <p>Tombamento</p>
Corrida	<p>Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação)</p> <p>Movimento semelhante ao de um líquido viscoso</p> <p>Desenvolvimento ao longo das drenagens</p> <p>Velocidades médias a altas</p> <p>Mobilização de solo, rocha, detritos e água</p> <p>Grandes volumes de material</p> <p>Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas</p>

Fonte: Augusto Filho (1992)

Mas a atual necessidade de acompanhar a evolução internacional na classificação de desastres levou a Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (SEDEC), órgão vinculado ao Ministério da Integração Nacional, a lançar no ano de 2012, a Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE).

O COBRADE foi elaborado para se adequar à classificação dos desastres do Banco de Dados Internacional de Desastres (EM-DAT), do Centro para Pesquisa sobre Epidemiologia de Desastres (CRED) da Organização Mundial da Saúde (OMS/ONU), além da possibilidade de o Brasil efetivamente contribuir para a alimentação deste banco de dados internacional (BRASIL, 2012).

Além dos motivos já citados, esta codificação é de extrema importância para a padronização dos registros de ocorrências no preenchimento do Formulário de Identificação de Desastres (FIDE) da Defesa e Proteção Civil, e também para facilitar a identificação dos desastres que ocorrem no Brasil (CEPED UFSC, 2014). Foram estabelecidos 82 tipos de desastres, divididos em duas categorias principais: natural e tecnológico. Dentro de cada categoria existem cinco grupos, determinados a partir da característica principal dos desastres, e há ainda os níveis de detalhamento: subgrupo, tipo, subtipo e o código COBRADE. O Quadro 3 expõe o grupo geológico referente ao tema do presente trabalho. Os grupos restantes que compõem o COBRADE são, na categoria natural: hidrológico, meteorológico, climatológico e biológico; na categoria tecnológica: desastres relacionados a substâncias radioativas, desastres relacionados a produtos perigosos, desastres relacionados a incêndios urbanos, desastres relacionados a obras civis e desastres relacionados a transporte de passageiros e cargas não perigosas.

Quadro 3 - Classificação e Codificação Brasileira de Desastres – COBRADE (2012)

Categoria	Grupo	Subgrupo	Tipo	Subtipo	COBRADE
Natural	1. GEOLÓGICO	1.Terremoto	1.Tremor de terra	0	1.1.1.1.0
			2.Tsunami	0	1.1.1.2.0
		2.Emanação vulcânica	0	0	1.1.2.0.0
		3.Movimento de massa	1.Quedas, tombamentos e rolamentos	1.Blocos	1.1.3.1.1
				2.Lascas	1.1.3.1.2
				3.Matacões	1.1.3.1.3
				4.Lajes	1.1.3.1.4
			2.Deslizamentos	1.Deslizamento de solo e/ou rocha	1.1.3.2.1
			3.Corridas de massa	1.Solo/Lama	1.1.3.3.1
				2.Rocha/Detrito	1.1.3.3.2
			4.Subsidências e colapsos	0	1.1.3.4.0
		4.Erosão	1.Erosão Costeira/Marinha	0	1.1.4.1.0
			2.Erosão de Margem Fluvial	0	1.1.4.2.0
			3.Erosão Continental	1.Laminar	1.1.4.3.1
				2.Ravinas	1.1.4.3.2
				3.Boçorocas	1.1.4.3.3

Fonte: SEDEC (2012) adaptado pela autora.

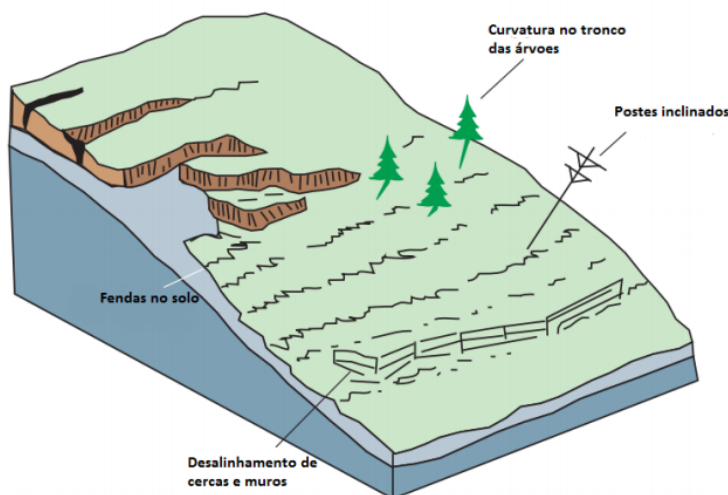
2.1.2.1 Rastejos

Os rastejos, também chamados fluência, são movimentos lentos e contínuos de material de encostas, sem limites bem definidos, podendo ocorrer em grandes áreas sem que se perceba diferença entre o material em movimento e o material estável. Rastejos podem movimentar qualquer material, solo, rocha ou ambos. A grande causa deste movimento é a ação da gravidade, tendo também influência a variação de temperatura e umidade do material. Segundo Guidicini e Nieble (1983), a variação térmica que provoca expansão e contração do material, se traduz em movimento encosta abaixo, numa espessura proporcional à atingida pela variação térmica. Abaixo desta profundidade, o rastejo se dá somente pela ação da gravidade.

“O mecanismo de deformação nos rastejos se assemelha ao de um líquido muito viscoso. A tensão a partir da qual os terrenos passa a sofrer fluência é menor do que a tensão de cedência ao cisalhamento” (GUIDICINI e NIEBLE, 1983).

Os principais indícios de rastejo incluem postes, árvores e cercas inclinados, pequenos terraços ao longo da encosta, trincas em paredes e outros, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Rastejo



Fonte: Highland e Bobrowsky (2008 *apud* Cruz, 2017)

2.1.2.2 Deslizamentos

Os deslizamentos são caracterizados como movimentos de massa rápidos, de duração relativamente curta, e de superfície de ruptura bem definido, o que permite a distinção entre o material movimentado e o material estável. Além disso, o centro de gravidade do material

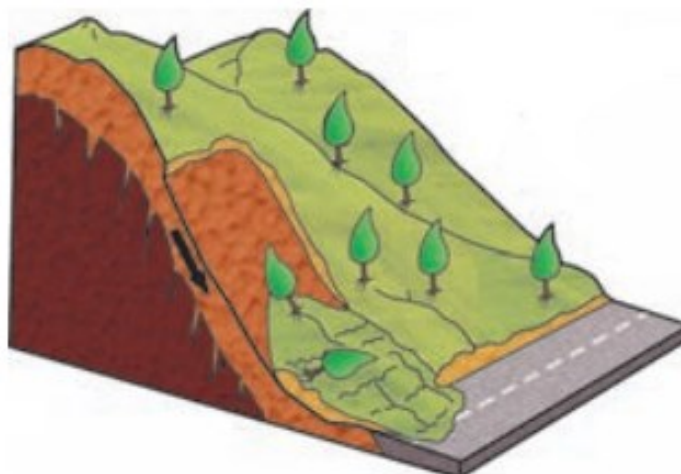
deslocado é direcionado para baixo e fora do talude. Os deslizamentos são divididos com base na forma do plano de ruptura, podendo ser planar, circular, em cunha ou mista (combinação de planar e circular). O material movimentado pode ser solo, rocha, uma mistura destes, ou até lixo doméstico (FERNANDES e AMARAL, 2011).

O início do movimento ocorre quando as tensões cisalhantes mobilizadas na massa de solo atingem a resistência ao cisalhamento do material (GERSCOVICH, 2012). O principal agente deflagrador dos deslizamentos são as chuvas, e os índices pluviométricos variam para cada região, sendo maiores para os deslizamentos generalizados e menores para os induzidos (OLIVEIRA, 2014). Massad (2010) cita as seguintes causas dos deslizamentos: alteração da geometria do talude, colocação de sobrecarga no topo das encostas, saturação do solo através da chuva e desmatamento. A velocidade máxima do movimento depende da inclinação da superfície de deslizamento, da causa inicial de movimentação e da natureza do movimento (GUIDICINI e NIEBLE, 1983).

a) Deslizamento translacional raso

Os deslizamentos planares ou translacionais, representado na Figura 2, são os mais frequentes. A superfície de ruptura tem o formato plano e a profundidade, em geral, varia de 0,5 m a 5,0 m, caracterizando um deslizamento comprido e plano. De acordo com Fernandes e Amaral (1996), está associada às heterogeneidades dos solos e rochas, e geralmente acompanha as descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas resultantes de processos geológicos, geomorfológicos ou pedológicos.

Figura 2 - Esquema de deslizamento translacional raso



Fonte: Souza *et al* (2009)

É mais comum de ocorrer durante períodos de precipitações intensas, na interface solo-rocha, onde a dinâmica hidrológica possui um caráter mais superficial e as rupturas tendem a ocorrer rapidamente, devido ao aumento da poropressão positiva durante eventos pluviométricos de alta densidade ou duração (FERNANDES e AMARAL, 1996).

Os deslizamentos translacionais, de acordo com Gerscovich (2016), podem ainda ser classificados em:

- Deslizamentos translacionais de rocha

As rupturas ocorrem nos planos de fraqueza associadas à estrutura geológica, como estratificação, xistosidade, juntas de alívio de tensões, falhas e outras;

- Deslizamentos translacionais de solo

As rupturas ocorrem ao longo de uma superfície plana condicionada a alguma feição estrutural do substrato. O movimento ocorre dentro do manto de alteração;

- Deslizamentos translacionais de solo e rocha

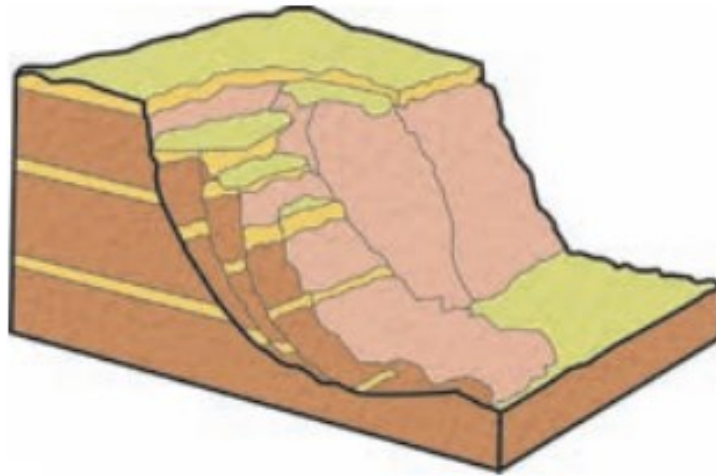
O movimento geralmente envolve depósitos de talus/colúvio, que se encontram nos sopés das escarpas, e são constituídos por blocos rochosos e fragmentos de tamanhos variados envolvidos em matriz terrosa, originado do mesmo processo de acumulação.

b) Deslizamentos circular ou rotacional

Os deslizamentos circulares ou rotacionais têm uma superfície de ruptura curva, côncava para cima, ao longo da qual ocorre o movimento rotacional da massa de solo, conforme esquema exposto na Figura 3. Geralmente ocorrem em locais de solos homogêneos e espessos. No Brasil, o movimento usualmente mobiliza o manto de alteração. Para Fernandes e Amaral (1996), o início do movimento está, na maioria das vezes, associado com cortes executados na base do material, como os praticados na implantação de estradas, ou pela erosão fluvial no sopé das encostas.

Estes movimentos são descritos como catastróficos por Guiducini e Nieble (1983), sendo causados pelo deslizamento súbito do solo residual que recobre a rocha, ao longo de uma superfície qualquer de ruptura ou ainda ao longo da própria superfície da rocha.

Figura 3 - Esquema de deslizamento circular

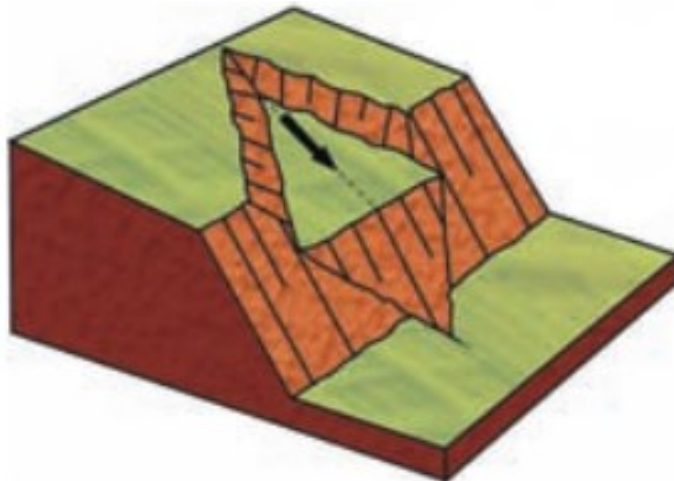


Fonte: Souza *et al* (2009)

c) Deslizamento em cunha

Os deslizamentos em cunha ocorrem quando os planos de fraqueza se cruzam ou quando camadas de menor resistência não são paralelas à superfície do talude, dando origem a uma superfície de ruptura que apresenta forma de cunha (GERSCOVICH, 2016). O esquema da seção típica do plano de ruptura é apresentado na Figura 4. Este tipo de deslizamento tem ocorrência mais restrita às regiões que apresentam o relevo fortemente controlado por estruturas geológicas e, são associados aos maciços rochosos pouco ou muito alterados. Ocorrem principalmente em taludes ou encostas que sofreram desconfinamento, tanto de origem natural quanto antrópica (SOUZA *et al*, 2009).

Figura 4 - Esquema de deslizamento em cunha

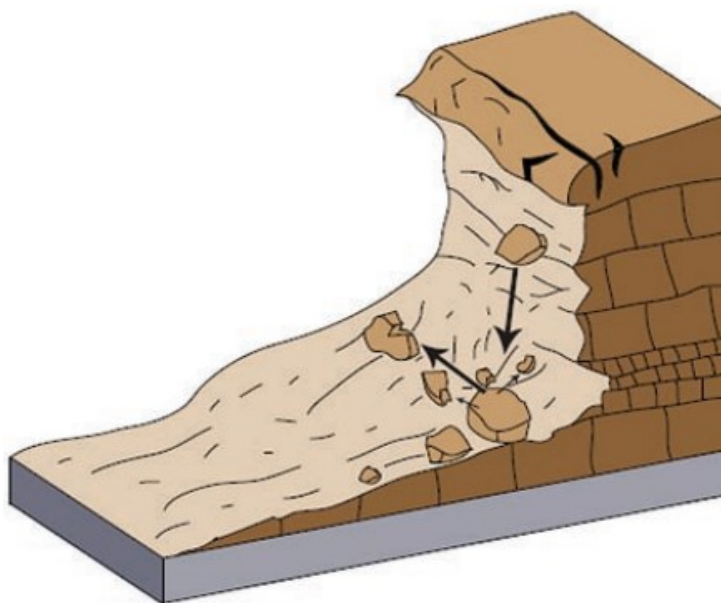


Fonte: Souza *et al* (2009)

2.1.2.3 Quedas

As quedas envolvem blocos de rocha que caem pela ação da gravidade em queda livre ou ao longo de um plano inclinado (Figura 5). Os blocos se formam por ação de diferentes forças atuantes nas fraturas, como a pressão hidrostática, a variação térmica do maciço rochoso, ou ainda pelo desconfinamento lateral, causado por obras, vibrações, etc (GERSCOVICH, 2016).

Figura 5 - Esquema de queda de blocos

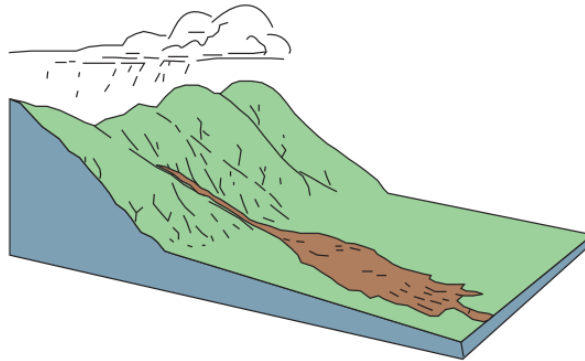


Fonte: Highland e Bobrowsky (2008)

2.1.2.4 Corridas

As corridas ou fluxos são movimentos rápidos que ocorrem quando o solo se comporta como um fluido altamente viscoso, perdendo completamente suas características de resistência, como mostra o esquema da Figura 6. Este movimento, em geral, está associado à presença de excesso de água em períodos de precipitação intensa. O processo de fluidificação tem diversas causas, como a adição de água em solos predominantemente arenosos, esforços dinâmicos (terremotos, cravação de estacas, etc), amolgamento em argilas muito sensíveis (GUIDICINI e NIEBLE, 1984)

Figura 6 - Esquema de corrida



Fonte: Highland e Bobrowsky (2008)

2.2 MÉTODOS DE ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES

O objetivo da análise de estabilidade é avaliar a possibilidade de ocorrência de deslizamentos de massa de solo presente em talude natural ou construído. Existem vários métodos para analisar a estabilidade de taludes terrosos e rochosos. Há as abordagens probabilísticas e as determinísticas. Segundo Tonus (2009), a análise determinística de estabilidade de taludes é dividida em dois grandes grupos: métodos baseados em análise de deslocamentos e métodos baseados em estado de equilíbrio limite.

Ainda de acordo com Tonus (2009), os métodos de equilíbrio limite se baseiam na hipótese de haver equilíbrio em uma massa de solo, tomada como corpo rígido, na iminência de entrar em processo de deslizamento. Esses métodos são amplamente utilizados, devido à facilidade de aplicação, precisão de resultados e à experiência acumulada ao longo dos anos. Segundo Gerscovich (2016), a análise, de modo geral, é feita comparando as tensões cisalhantes desenvolvidas no plano de ruptura mais provável com a resistência do solo ao cisalhamento. A relação entre estas forças é expressa pelo Fator de Segurança FS ou Coeficiente de Segurança (CS), conforme mostrado na equação (1).

$$FS = \frac{\sum \text{Forças Resistentes}}{\sum \text{Forças Cisalhantes}} \quad (1)$$

A determinação da estabilidade do talude dependerá da magnitude do valor de FS, sendo que:

- Caso o FS resultante seja inferior a 1, o talude é considerado instável e está suscetível a ruptura;
- Caso o FS resultante seja igual a 1, as forças resistentes são iguais às forças cisalhantes e, dessa forma, o talude encontra-se na iminência de ruptura;
- Caso o FS resultante seja maior que 1, o talude é considerado estável. Ademais, quanto maior for o FS resultante, mais estável será o talude.

2.2.1 Método de Fellenius

De acordo com Guiducini e Nieble (1983), o método sueco ou das fatias foi desenvolvido por Fellenius, baseado na análise estática do volume de material situado acima de uma superfície potencial de deslizamento de seção circular, sendo esse volume dividido em fatias verticais. O fator de segurança FS é determinado somente pela análise dos momentos atuantes no talude, desprezando-se as forças de interação interlamelares.

Ao negligenciar as forças laterais das fatias e não satisfazer o equilíbrio de forças horizontais e nem verticais, o método de Fellenius torna-se bastante limitado sendo considerado um método bem conservador e pouco utilizado nos dias de hoje (TONUS, 2009).

2.2.2 Método de Bishop Simplificado

Segundo Das (2013), Bishop, em 1955, propôs uma solução mais refinada para o método comum das fatias, no qual o efeito das forças nas faces de cada fatia é levado em conta só até certo ponto. Mas assim como no método comum das fatias, várias superfícies de ruptura devem ser investigadas para que se possa encontrar a superfície crítica que fornece o fator de segurança mínimo. Este método é conhecido como método de Bishop simplificado.

O método de Bishop simplificado admite superfície de ruptura circular e considera que as forças nas laterais das fatias são horizontais, desconsiderando as forças tangenciais entre elas.

O fator de segurança pelo método de Bishop é definido pela equação (2) onde n é o número de fatias, variando de 1 a p .

$$F_S = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c' b_n + W_n \tan \phi') \frac{1}{m \alpha_n}}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n} \quad (2)$$

Onde:

c' = Coesão do solo;

ϕ' = Ângulo de atrito interno do solo;

W = peso da fatia do solo;

α = inclinação da parte inferior da fatia com a direção horizontal;

m = número de estabilidade.

2.2.3 Modelo SHALSTAB

O modelo SHALSTAB (*Shallow Landslide Stability Analysis* - análise de estabilidade de deslizamentos rasos, em tradução livre) foi desenvolvido por Montgomery e Dietrich em 1994.

O SHALSTAB possui uma abordagem determinística e combina um modelo hidrológico com um outro de estabilidade de encostas, dentro de um ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica). O modelo utiliza uma grade regular e calcula, para cada célula da grade, o grau de suscetibilidade a deslizamento (GUIMARÃES *et al*, 2008).

2.2.3.1 Modelo de estabilidade de encosta infinita

O modelo de estabilidade de encosta baseia-se no critério de Mohr-Coulomb, que define a tensão resistente é apresentado na equação (3).

$$\tau = c + (\sigma - \mu) * \tan \phi \quad (3)$$

Onde:

τ = Tensão de cisalhamento tangencial [N/m²]

c = Coesão do solo [N/m²]

σ = Tensão normal [N/m²]

μ = Poropressão [N/m²]

ϕ = Ângulo de atrito interno do solo [graus]

Na análise de deslizamentos translacionais rasos, comuns no Brasil, Guimarães *et al* (2008) comentam que é utilizado o modelo de estabilidade de encosta infinita, onde os efeitos causados pelo atrito nas laterais e nas extremidades são desprezados, e a análise é considerada em relação a um plano infinito de solo sobre um plano inclinado, isto é, considera-se que o comprimento da encosta é significativamente maior que a sua profundidade. Dessa forma, a aplicação da equação (3) para encostas infinitas é expressa pela equação (4).

$$\frac{h}{z} = \frac{c}{g.z.\cos^2 \theta.\tan \phi.\rho_w} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right) \quad (4)$$

Onde:

h = altura da coluna d'água no subsolo [m]

z = espessura vertical de solo [m]

h/z = proporção da coluna de solo saturado

g = gravidade [m/s^2]

θ = declividade do solo [graus]

ρ_w = densidade da água [kg/m^3]

ρ_s = densidade do solo úmido [kg/m^3]

2.2.3.2 Modelo hidrológico de Estado Uniforme

O modelo hidrológico de estado uniforme foi desenvolvido por O'Loughlin (1986) a partir do modelo descrito por Beven e Kirkby (1979). Guimarães *et al* (2008) nos esclarece que o modelo de O'Loughlin (1986) define um padrão de equilíbrio de saturação do solo baseado na análise da área de contribuição a montante, transmissividade do solo e declividade. Neste modelo, considera-se que o fluxo de água se infiltra no solo até o plano de menor condutividade, geralmente o contato solo-rocha, seguindo então um caminho determinado pela topografia. Este modelo pode ser descrito pela equação (5) e a Figura 7 traz exposto a representação do modelo.

$$W = \frac{Q.a}{T.b.\sin \theta} \quad (5)$$

Onde:

W = umidade do solo [m/m]

Q = taxa de recarga uniforme (intensidade da chuva) [m/d]

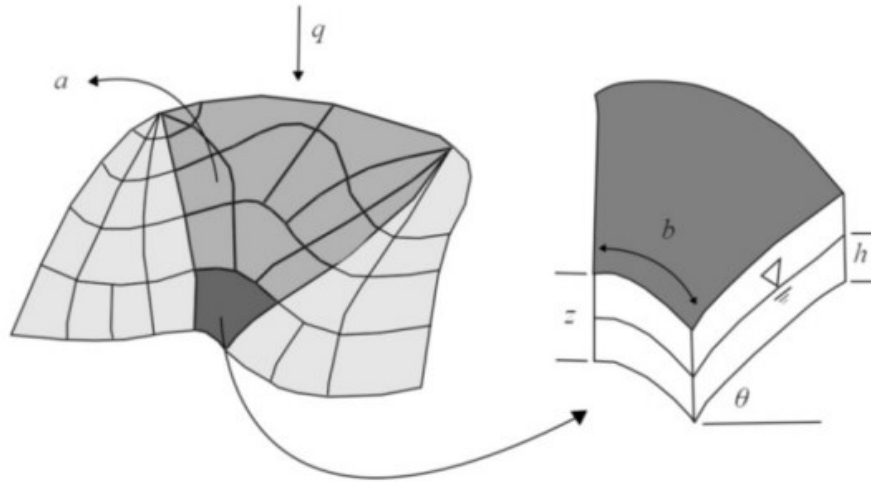
a = área de contribuição a montante [m^2]

T = transmissividade do solo [m^2/dia]

b = comprimento de contorno unitário [m]

θ = declividade local [graus]

Figura 7 - Modelo hidrológico de Estado Uniforme



Fonte: Michel (2013, apud modificado de Montgomery e Dietrich, 1994)

Desta forma, O'Loughlin (1986) define que o índice de umidade (W) é a condição de saturação quando esta se apresenta em estado de equilíbrio. Montgomery e Dietrich (1994) também nos menciona que a razão Q/T corresponde ao controle hidrológico, e a razão $a/b.\sin\theta$ corresponde ao controle morfológico. Além disso, de acordo com Montgomery e Dietrich (1994), o modelo hidrológico desenvolvido por O'Loughlin (1986) pode ser escrito em função da razão h/z , na forma da equação (6).

$$\frac{h}{z} = \frac{Q.a}{T.b.\sin\theta} \quad (6)$$

2.2.3.3 Combinação entre o modelo de estabilidade de encosta e o modelo hidrológico

A partir da razão h/z , pode-se combinar o modelo de estabilidade de encosta e o modelo hidrológico, obtendo-se a equação (7).

$$\frac{Q.a}{T.b.\sin\theta} = \frac{c}{g.z.\cos^2\theta.\tan\phi.\rho_w} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) \quad (7)$$

Reescrevendo a equação em função da quantidade de chuva, em estado de equilíbrio, necessária para a ocorrência de deslizamentos, obtemos a equação (8).

$$Q = \frac{T}{a/b} \sin\theta \frac{c}{g.z.\cos^2\theta.\tan\phi.\rho_w} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) \quad (8)$$

A equação (8) é utilizada em função de Q e T como rotina automatizada pelo SHALSTAB para traduzir, para cada célula da grade, o nível de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos translacionais rasos, resultando a equação (9).

$$\frac{Q}{T} = \frac{\sin \theta}{a/b} \left(\frac{c}{g.z.\cos^2 \theta.\tan \phi.\rho_w} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right) \quad (9)$$

Assim, o modelo SHALSTAB utiliza três variáveis topográficas (a área drenada (a), o comprimento de contorno (b) e o ângulo da encosta (θ)), três variáveis de propriedades do solo (a densidade do solo (ρ_s), o ângulo de atrito interno (ϕ) e a transmissividade do solo (T)), além da precipitação efetiva (Q) e da coesão (c) (GUIMARÃES *et al*, 2008). Os parâmetros de entrada requeridos pelo modelo SHALSTAB são: c , ϕ , ρ_s e z . As demais variáveis a, b, e θ são obtidas através de um modelo digital do terreno (MDT) de boa qualidade (MICHEL *et al*, 2012).

Montgomery e Dietrich (1994) propuseram originalmente sete classes de estabilidade, que expressam a chance de ocorrência de deslizamentos, sendo que as duas classes extremas representam áreas incondicionalmente instáveis e áreas incondicionalmente estáveis (MICHEL *et al*, 2012). O Quadro 4 apresenta as classes de estabilidade. O Quadro 5 apresenta condições para cada classe de estabilidade.

Quadro 4 - Classes de estabilidade segundo o modelo SHALSTAB

	Sigla	log (Q/T)
Instáveis	A	-10 - -9,9
	B	-9,9 - -3,1
	C	-3,1 - -2,8
	D	-2,8 - -2,5
Estáveis	E	-2,5 - -2,2
	F	-2,2 - 9,9
	G	9,9 - 10

Fonte: Autora

Quadro 5 - Classes de estabilidade em função da razão a/b e $\tan \theta$

Classe de estabilidade	Condição
A) Incondicionalmente estável e saturado	$a/b > (T/Q) \sin \theta$ $\tan \theta \leq \tan \phi (1 - \rho_w/\rho_s)$
B) Incondicionalmente estável e não saturado	$a/b < (T/Q) \sin \theta$ $\tan \theta \leq \tan \phi (1 - \rho_w/\rho_s)$
C) Estável e não saturado	$a/b < (T/Q) \sin \theta$ $\tan \phi (1 - \rho_w/\rho_s) < \tan \theta < \tan \phi$ $\frac{a}{b} < \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right) \frac{T}{Q} \sin \theta$
D) Instável e não saturado	$a/b < (T/Q) \sin \theta$ $\tan \phi (1 - \rho_w/\rho_s) < \tan \theta < \tan \phi$ $\frac{a}{b} \geq \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right) \frac{T}{Q} \sin \theta$
E) Instável e saturado	$a/b > (T/Q) \sin \theta$ $\tan \phi (1 - \rho_w/\rho_s) < \tan \theta < \tan \phi$ $\frac{a}{b} > \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right) \frac{T}{Q} \sin \theta$
F) Incondicionalmente instável e não saturado	$\tan \theta > \tan \phi$ $a/b < (T/Q) \sin \theta$
G) Incondicionalmente instável e saturado	$\tan \theta > \tan \phi$ $a/b > (T/Q) \sin \theta$

Fonte: Montgomery e Dietrich (1994 *apud* Ramos et al., 2002)

2.2.3.4 Aplicação do modelo SHALSTAB no Brasil

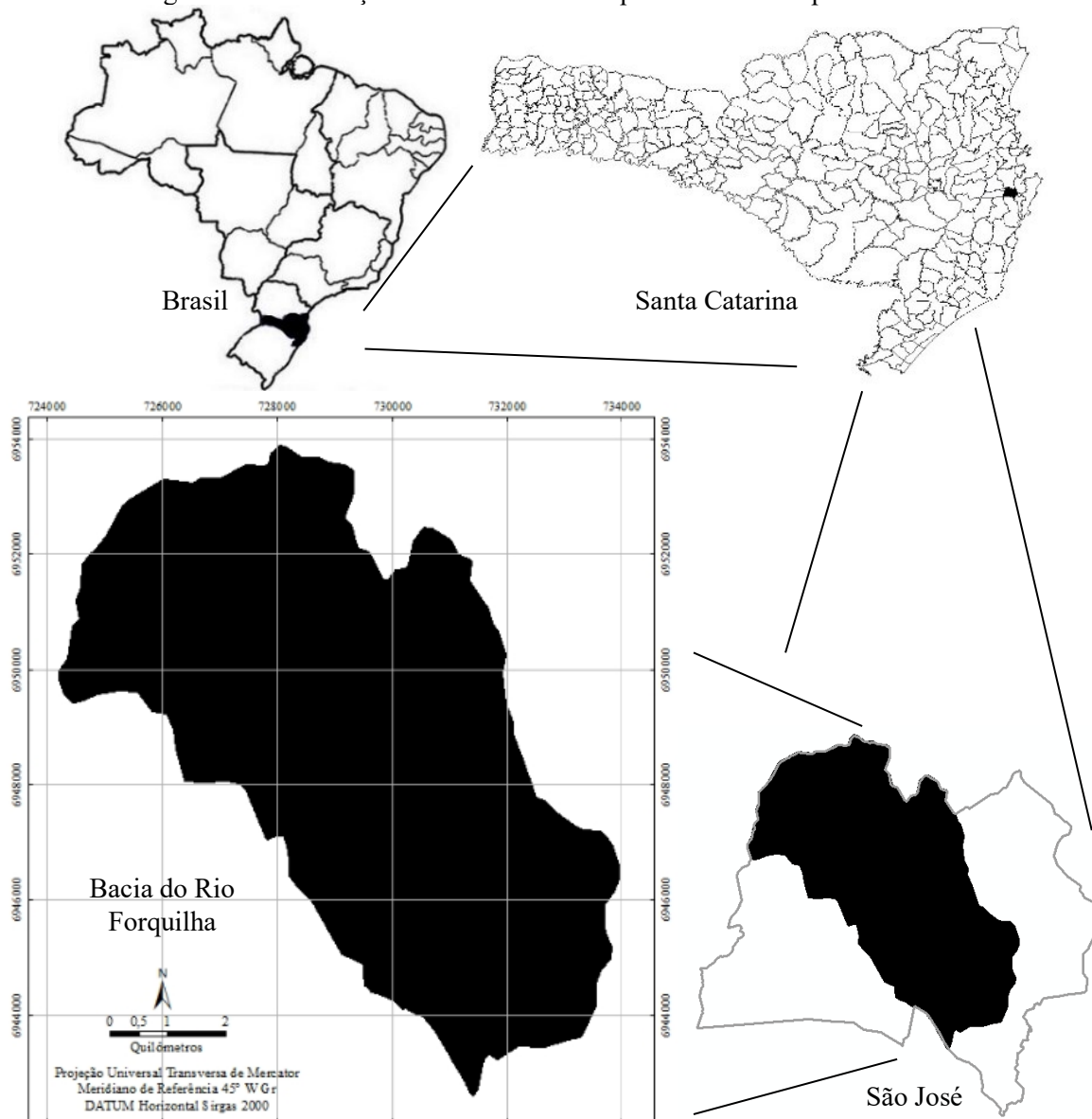
No Brasil, o modelo SHALSTAB já foi aplicado em diversos estudos de diferentes regiões, que apresentaram resultados satisfatórios. Algumas das pesquisas foram: no Rio de Janeiro foi utilizado por Guimarães (2000) no Maciço da Tijuca; em Santa Catarina, foi utilizado por Michel (2013) na bacia do rio Cunha e Sbroglia (2015) na bacia do ribeirão Baú (Ilhota/SC).

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de São José localiza-se entre os paralelos 27°31'30" e 27°38'31" latitude Sul e os meridianos 48°44'50" e 48°35'20" longitude Oeste, possui área de 150,453 km² e população estimada em 2017 de 239.718 pessoas (IBGE, 2018). Pertencendo a região da Grande Florianópolis, no estado de Santa Catarina, São José faz divisa ao Norte com os municípios de Biguaçu e Antônio Carlos, à Leste com o município de Florianópolis e o Oceano Atlântico, ao Sul com os municípios de Palhoça e Santo Amaro da Imperatriz e, à Oeste se limita com São Pedro de Alcântara (PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO JOSÉ, 2018).

A Figura 8 apresenta a localização da bacia do rio Forquilhas.

Figura 8 – Localização da bacia do rio Forquilhas no município de São José



Fonte: Autora.

A bacia do rio Forquilhas localiza-se na porção centro-noroeste do município de São José e ocupa grande parte da cidade. A porção centro-sul da bacia encontra-se em elevado estágio de urbanização, enquanto que as demais áreas não sofreram muitas intervenções, estando a mata nativa preservada, conforme pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Bacia do rio Forquilhas



Fonte: Autora.

3.1 CLIMA E COBERTURA DO SOLO

De acordo com Pandolfo *et al.* (2002), a classificação climática da região, segundo os critérios de Koeppen, é do tipo Cfa ou Subtropical mesotérmico úmido, tendo como características chuvas bem distribuídas durante o ano e verão quente. A pluviosidade média varia de 1700-2100 mm por ano.

De acordo com GT Cadastro (2004), com relação a cobertura vegetal do município, cerca de 77% do território está coberto com vegetação diversa, sendo que mais da metade deste total são formações florestais em distintos estágios de regeneração. A cobertura vegetal mais representativa corresponde à floresta submontana em diversos estágios de regeneração espontânea, com presença esporádica de reflorestamento com eucalipto (GT CADASTRO, 2004).

A área de estudo está inserida na Região da Floresta Ombrófila Densa (Mata Atlântica), que é subdividida em Floresta Ombrófila Densa Montana, Floresta Ombrófila Densa Submontana e em Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas. A Floresta Ombrófila Densa Submontana corresponde a maior parte da Floresta Ombrófila Densa da costa Atlântica, em altitudes que variam de 30 a 400 m, apresentando árvores de grande porte (FERREIRA, 1994 *apud* CARDOZO 2009).

3.2 HIDROGRAFIA

A drenagem hídrica do município de São José está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão Sul, fazendo parte da Região Hidrográfica Litoral Centro Catarinense, na Região Hidrográfica do Atlântico Sul (GT CADASTRO, 2004; IBGE, 2009; SANETAL, 2014).

Segundo Cardozo (2009), o rio Forquilhas é responsável pela drenagem de uma grande parcela do município de São José e atravessa a área na direção Noroeste-Sudeste até desaguar no rio Maruim pela margem esquerda. Possui 12 km de extensão e sua bacia apresenta 52 km², aproximadamente, com a maior altitude chegando a 542 metros.

Com a crescente urbanização do município, a interferência antrópica alterou o curso original do rio, retificando-o. O mesmo processo ocorreu com seus afluentes, os quais, na maioria dos casos, encontram-se canalizados, principalmente nas áreas com maior densidade de ocupação da bacia (HERRMANN e CARDOZO, 2008; CARDOZO, 2009).

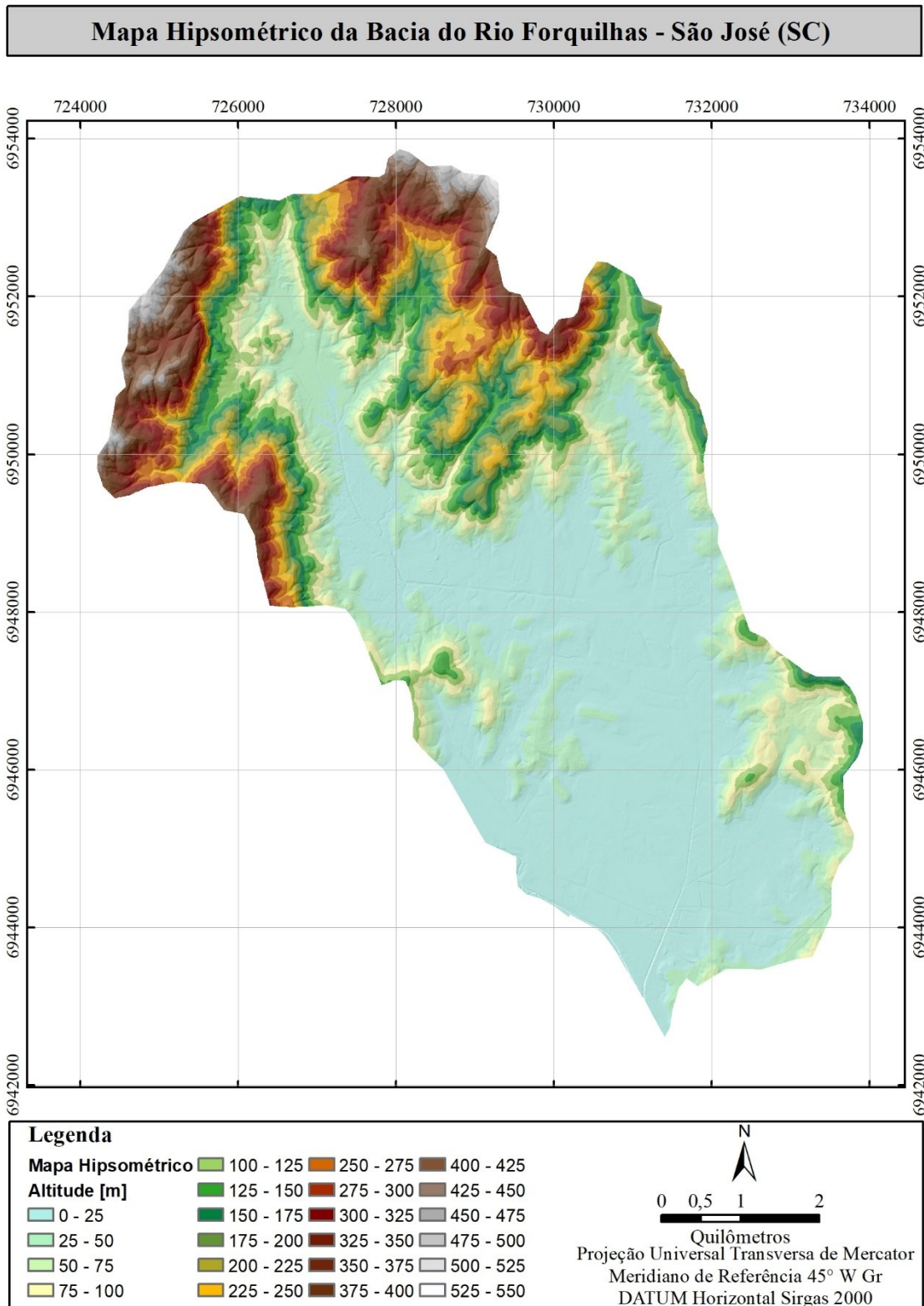
3.3 GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

Segundo Ferreira (1994), a geologia da área de estudo é caracterizada por dois domínios morfoestruturais: o Embasamento Cristalino, formado por rochas em vários graus de metamorfismos (gnaisses, migmatitos, xistos) além de granitos e diabásios; e a Cobertura Sedimentar Quaternária, constituída por depósitos inconsolidados ou fracamente consolidados de areias, silte, argila e conglomerado.

A unidade de relevo é caracterizada como do tipo Serras do Leste Catarinense, de acordo com o Mapa de Unidades de Relevo do Brasil, do IBGE (2006). O ponto mais alto da bacia do rio Forquilhas possui 540 metros de altura.

O mapa hipsométrico é apresentado na Figura 10. As maiores altitudes estão concentradas na região noroeste da bacia do rio Forquilhas e as menores na região centro-sul.

Figura 10 - Mapa hipsométrico da bacia do rio Forquilhas



Fonte: LAMGEO (2015), adaptado pela autora

3.4 MAPA GEOTÉCNICO DA BACIA DO RIO FORQUILHAS

O mapa geotécnico do município de São José foi elaborado por LAMGEO (2015) e possui escala 1:10.000. A elaboração do mapa foi com base na metodologia de Dias (1995). O mapa geotécnico apresentado na Figura 11 mostra as unidades geotécnicas da Bacia do Rio Forquilhas em um total de 12 unidades, cuja abrangência é apresentada no Quadro 6.

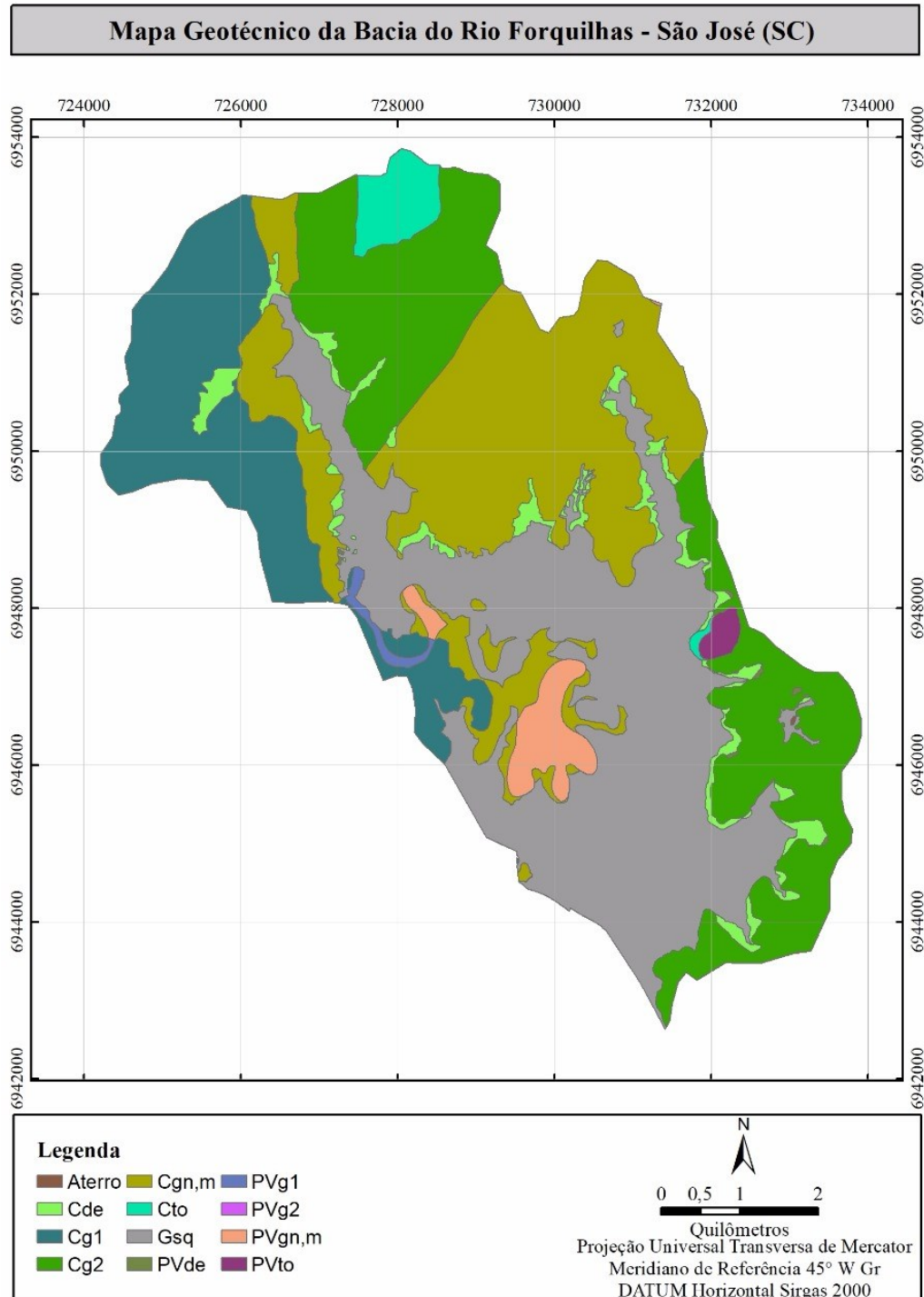
Quadro 6 - Abrangência das unidades geotécnicas da área de estudo

Unidade	Descrição	Área [km²]
Cg1	Cambissolo de substrato granito São Pedro de Alcântara	30,096
Gsq	Gleissolo de substrato sedimentos quaternários	19,971
Cg2	Cambissolo de substrato granito Alto da Varginha	19,368
Cgn,m	Cambissolo de substrato gnaiss e migmatito	13,417
Cde	Cambissolo de substrato depósito de encosta	1,878
PVgn,m	Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato gnaiss e migmatito	1,243
Cto	Cambissolo de substrato tonalito	1,086
PVg2	Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granito Alto da Varginha	0,621
PVto	Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato tonalito	0,234
PVg1	Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granito São Pedro de Alcântara	0,209
PVde	Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato depósito de encosta	0,045
Aterro	Aterros	0,005
TOTAL		88,173

Fonte: Autora.

Segundo Rosolem (2014), a bacia é formada por solos residuais e solos coluviais e aluvionares. Os solos residuais, originados a partir de granitos, gnaisses e suas variações, se localizam nos trechos mais elevados de encostas; os solos aluvionares são encontrados na região de planície e, os solos coluvionares são normalmente localizados nos trechos inferiores das encostas. Os solos que compõem a bacia do rio Forquilhas possuem elevada suscetibilidade a erosão.

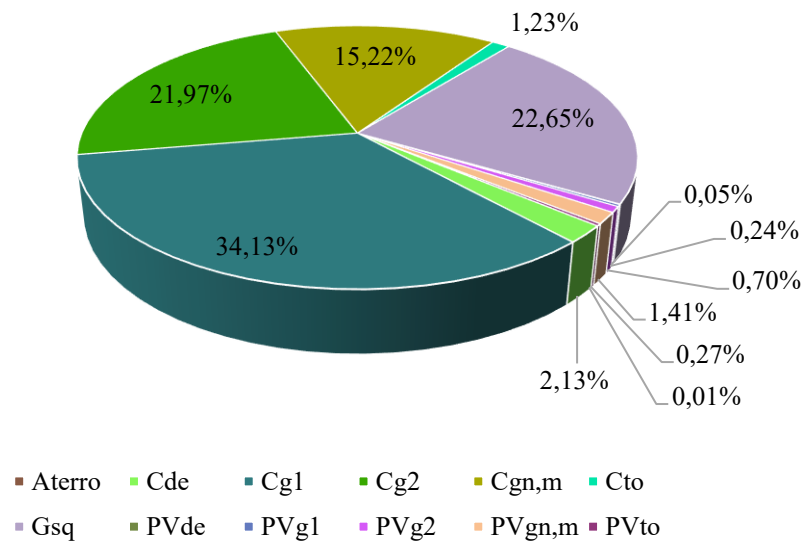
Figura 11 - Mapa geotécnico da bacia do rio Forquilhas



Fonte: LAMGEO (2015), adaptado pela autora

A distribuição percentual das unidades geotécnicas é apresentada na Figura 12.

Figura 12 - Distribuição das unidades geotécnicas



Fonte: Autora

Como pode-se observar, a unidade geotécnica predominante na bacia do rio Forquilhas é a Cambissolo de substrato granito São Pedro de Alcântara, a qual abrange 34,13% da área. As demais unidades geotécnicas mais representativas são o Cambissolo de substrato granito Alto da Varginha e o Cambissolo de substrato gnaisse e migmatito, ambas unidades localizadas nas elevações da bacia. Nas áreas baixas e planas, há a predominância da unidade Gleissolo de substrato sedimentos quaternários, com 22,65% da área.

3.4.1 Descrição das Unidades Geotécnicas Presentes na Bacia do Rio Forquilhas

Um resumo das características gerais das unidades geotécnicas que compõem a área de estudo foi realizado de acordo com os trabalhos apresentados por Davison Dias (1995), Santos (1997), Higashi (2006), IBGE (1995 e 2003) e LAMGEO (2015).

Cambissolo de substrato granito

Na bacia do Rio Forquilhas há a ocorrência de duas unidades geotécnicas pertencentes ao grupo Cambissolo de substrato granito:

- Cambissolo de substrato granito São Pedro de Alcântara (Cg1);
- Cambissolo de substrato granito Alto da Varginha (Cg2);

Juntas, essas unidades geotécnicas cobrem 56,10% da área da bacia. Abrangem uma faixa muito ampla de relevo, desde suave ondulado até escarpado, com espessura variando muito desde raso até profundo. O Cambissolo contém os horizontes superficiais, A e B, pouco espessos, que somados geralmente são menores que 1 metro, logo a espessura do solo é fundamentalmente em função do horizonte C. O substrato de granito possui textura essencialmente arenosa.

O Cambissolo de substrato granito apresenta um perfil formado por um horizonte A e um horizonte B, ambos com espessuras em torno de 50cm (ou inferiores) e um horizonte C com a estrutura do granito. Neste horizonte podem ainda ser identificados os minerais primários da rocha de origem, apresentando a aparência de rocha, porém com comportamento mecânico (deformação e resistência) e hidráulico de solo.

Trata-se de solos não hidromórficos com drenagem variando de acentuada a imperfeita e apresentam um horizonte B pouco desenvolvido (câmbico) devido alguns fatores relativos aos processos de origem e formação dos solos. Seu horizonte B é considerado pequeno pela Pedologia (horizonte B incipiente). Apresenta variação de horizontes A-B-C usualmente modesta, mas diferenciável a olho nu. São solos derivados dos mais diversos materiais de origem e encontrados sob condições climáticas variadas. Quando derivados do granito, que é o caso da bacia em estudo, é usual a presença (>4%) de fragmentos de rochas e/ou minerais primários facilmente intemperizáveis, pelo menos a presença de areia fina.

Há uma forte incidência neste horizonte de rochas pouco intemperizadas em uma matriz areno-siltosa, resultante da elevada quantidade de quartzo, o que pode ocasionar em rolamento de matacões.

O horizonte C dos Cambissolos da bacia de do rio Forquilhas podem apresentar profundidades variáveis, pois ocorrem em uma topografia bastante irregular, e muitas vezes podem resultar em elevadas espessuras do seu horizonte C, podendo alcançar profundidades superiores a 10m.

A profundidade e o horizonte essencialmente arenoso (e grosseiro) do Cambissolo de substrato granito favorece a ocorrência de processos erosivos.

A resistência ao cisalhamento do Cambissolo eleva com a variação da profundidade e a compressibilidade reduz em razão da proximidade da rocha de origem. O comportamento geotécnico desta unidade de solo em seu horizonte C é regido, predominantemente, pelas características herdadas da rocha de origem, uma vez que este horizonte, que é a camada de solo mais espessa para esta unidade, pode apresentar grande quantidade de minerais não

decompostos pelos processos de intemperismo da rocha matriz. Desta forma, dependendo da constituição mineralógica do horizonte C do solo, esta camada pode apresentar grande variação de valores de CBR, expansão, coeficiente de colapso, entre outros, por exemplo.

Ressalta-se que a utilização desta unidade como absorvente de efluentes domésticos dependa da espessura do horizonte C. Caso o horizonte C seja raso, estima-se que o solo não seria suficiente para tratar de efluentes de forma física e, mesmo que a capacidade de troca catiônica seja elevada, de forma química.

Cambissolo de substrato gnaiss e migmatito

Esta unidade está presente em 15,22% da área da bacia. A unidade Cgn é composta por solos com horizonte B incipiente e com origem de gnaiss e migmatitos, apresentando todas as sequências de horizontes de espessura variável. O relevo é acidentado, variando do ondulado a escarpado. Os horizontes RA (rocha alterada) e R (rocha sã) apresentam elevada resistência.

Os Cambissolos de substrato gnaiss são solos não hidromórficos e apresentam toda a sequência de horizonte A-B-C-RA-R de espessura bastante variável. São solos encontrados em relevos mais acidentados, onde o processo pedogenético ocorreu de forma pouco intensa.

O horizonte A é, na maioria das vezes, removido em obras de engenharia apesar de sua grande importância em relação à erodibilidade dos solos.

O horizonte B deste tipo de solo é incipiente, pouco espesso (até 0,5m - horizonte câmbico) e caracteriza-se por apresentar, em quase todas as observações realizadas, pouca resistência (todos os substratos). Apresenta pequeno grau de desenvolvimento, insuficiente para decompor totalmente os minerais primários facilmente intemperizáveis, ou para reduzir os teores de silte a níveis suficientemente baixos.

O horizonte C (saprolítico) deste tipo de solo apresenta-se significativamente profundo na localidade. Este horizonte apresenta boa resistência à compressão em seu estado natural confinado, porém, como se trata de um horizonte saprolítico de gnaiss, cuidados devem ser tomados em relação à estabilidade de encostas. O horizonte C, mais suscetível ao movimento de massa, deve ser considerado semelhante ao horizonte C da unidade PVgn, ou seja, deve ser considerado de elevada instabilidade.

O horizonte C desta unidade é suscetível a processos erosivos hídricos, e não deve ficar exposto às intempéries.

Os horizontes RA e R (rocha alterada e rocha sã, respectivamente) deste tipo de solo apresentam elevada resistência. A execução de cortes e a solicitação mecânica nestes horizontes

devem estar condicionadas às fraturas e falhas geológicas que poderiam proporcionar algum tipo de instabilização.

Cambissolo de substrato depósito de encosta

A unidade geotécnica Cambissolo de substrato depósito de encostas abrange cerca de 2,13% da bacia do rio Forquilhas. Esta unidade geotécnica se apresenta em relevo suave ondulado na transição da encosta para a planície de sedimentação. A formação desta unidade advém de solos de horizonte B incipiente de origem de deposição gravitacional e pluvial de sedimentos do alto da encosta. A origem coluvionar é pouco significativa nos solos desta área, sendo o substrato mais encontrado os sedimentos aluvionares.

Os Cambissolos cujo substrato são os depósitos de encosta ocorrem na transição entre as elevações e a planície de sedimentação. Estes solos apresentam, em geral, uma evolução pedogenética para constituir um horizonte B incipiente ou concentrações de ferro suficientes para formar um horizonte B plíntico.

A origem coluvionar é pouco significativa para os solos desta área de mapeamento. O substrato mais encontrado são os sedimentos aluvionares.

Trata-se de uma unidade geotécnica nomeadamente problemática, por apresentar seu substrato com predominância de sedimentos aluvionares e por localizar-se em cotas mais baixas e de pequenas declividades, sua restrição geotécnica ao uso e ocupação pode ser classificada como moderada a baixa.

Deve-se ter um maior cuidado do uso e ocupação das regiões mais próximas das planícies em relação a profundidade do nível d'água e, conseqüentemente, contaminação do lençol freático.

Caso o solo apresente-se parcialmente saturado, devido ao seu caráter arenoso, esta unidade pode manifestar características colapsíveis.

Cambissolo de substrato tonalito

Esta unidade geotécnica está presente em 1,23% da área da bacia. As características do solo desta unidade são semelhantes às demais unidades que o tipo de solo Cambissolo. Entretanto, a resistência deste solo é considerada baixa, de modo que as encostas desta unidade se apresentam na condição instável.

Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granito

Na bacia do Rio Forquilhas há a ocorrência de duas unidades geotécnicas pertencentes ao grupo Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granito:

- Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granito São Pedro de Alcântara (PVg1);
- Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granito Alto da Varginha (PVg2);

Juntas, essas unidades geotécnicas cobrem 0,94% da área da bacia. Os Podzólicos Vermelho-Amarelos de substrato granito são característicos de regiões de clima úmido, com perfis bem desenvolvidos, profundidade mediana, moderadamente ou bem intemperizados. Esta unidade apresenta um horizonte A inferior a 50cm, um horizonte B de cores vermelhas com aproximadamente 1m de espessura, mais argiloso que o horizonte A, e um horizonte C granular, podendo alcançar até 30m de espessura.

O teor de argila presente em seu horizonte B (de cor vermelha ou vermelho-amarelada), normalmente, é bem maior do que a quantidade deste material localizada no horizonte A.

O comportamento mecânico do horizonte C (saprólítico) desta unidade, assemelha-se ao comportamento descrito para a unidade de Cambissolo de substrato granito, pois também guarda a estrutura da rocha de origem, com presença de matações (intemperismo esferoidal), e apresenta um comportamento variável em função do grau de intemperismo dos minerais primários presentes no horizonte C.

Estes horizontes (B e C), em geral, são parcialmente saturados e bem drenados.

O horizonte B apresenta um índice de resistência à penetração dos 30cm finais do amostrador padrão da sondagem à percussão com circulação d'água (N_{spt}) entre 5 e 7. No horizonte C, o número de golpes é superior a 12, e a resistência é crescente à medida que a rocha de origem se aproxima. No que diz respeito ao uso e ocupação por fundações superficiais de edificações, estas devem ser assentadas após o horizonte B, e assim contar com maior resistência e menor compressibilidade.

Uma característica importante dos solos da unidade PVg é a redução da resistência ao cisalhamento com a elevação do grau de saturação do solo. Assim como a unidade Cg, este solo apresenta significativa perda de coesão com a variação do grau de saturação, independente do substrato e do horizonte (B ou C). Essa redução, notada para a coesão do solo, é observada em menor escala no ângulo de atrito interno, que, algumas vezes, eleva seu valor.

O horizonte C é suscetível à erosão. Desta forma, é importante manter o horizonte A e B dos solos em obras de engenharia que envolvam grande movimentação de terra.

Devido à anisotropia, típica do horizonte C deste tipo de unidade, ocorre a grande dispersão dos resultados de ensaios geotécnicos. Mesmo no horizonte B, a variação da textura interna desta camada de solo também é responsável pela variabilidade dos resultados.

Nos locais onde ocorrem diques de diabásio, as espessuras de solo são maiores e o horizonte C, dependendo do grau de alteração, pode ser expansivo. O solo de alteração de diabásio pode ocorrer dentro dos maciços rochosos, ou abaixo de corpos graníticos de grandes dimensões, trazendo sérios problemas geotécnicos para obras de engenharia. Os movimentos de massa que ocorrem nesta unidade, geralmente estão associados aos diques de diabásio.

Na unidade Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granito, tanto o horizonte B quanto o C são bem drenados e apresentam lençol freático profundo, o que permite a sua utilização como absorvente de efluentes domésticos.

Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato gnaisse e migmatito

Esta unidade geotécnica está presente em 1,41% da bacia do rio Forquilhas.

Os solos do tipo Podzólico Vermelho-Amarelo agrupam as unidades que apresentam o horizonte B textural, possuindo uma sequência marcante de horizonte A-B-C-RA-R de espessura bastante variável.

Assim como no Cambissolo, o horizonte A em obras de engenharia na maioria das vezes é removido, apesar de sua grande importância em relação à erodibilidade dos solos. Tendo como base o trabalho desenvolvido por Meireles e Davison Dias (2004), ressalta-se que existe uma forte tendência de esta unidade apresentar altas taxas de erodibilidade, mesmo não condicionando, muitas vezes, à declividade.

O horizonte B deste tipo de solo é considerado relativamente profundo (1,5 a 2m), com minerais moderadamente ou bastante intemperizados, muitas vezes apresentando características de solos lateríticos nesta camada (pode apresentar um comportamento muito eficiente em seu estado compactado).

No geral, e em comparação aos solos residuais de granito encontrados na bacia em estudo, a resistência do horizonte B pode ser considerada baixa.

Este horizonte apresenta coloração avermelhada ou vermelho-amarelada, sobretudo em razão da acumulação de argilas. Esta variação da coloração depende do substrato, sendo que

os Cambissolos de substrato granito resultam em cores mais claras e os de substrato gnaisse mais escuras.

Em relação a fundações de edificações, o horizonte C deste tipo de solo apresenta resistência significativa quando confinado, devendo sua ocupação estar condicionada, sobretudo, às declividades e estruturas pedológicas em que se encontram.

Este horizonte (horizonte C) é suscetível a movimentos de massa, sobretudo em razão da herança das características da rocha de origem e das elevações das poropressões decorrentes da retenção excessiva de água que o horizonte C dos Podzólicos Vermelho-Amarelos de substrato gnaisse podem apresentar.

Os horizontes RA e R (rocha alterada e rocha sã, respectivamente) deste tipo de solo apresentam elevada resistência. A execução de cortes e a solicitação mecânica nestes horizontes devem estar condicionadas às fraturas e falhas geológicas que poderiam proporcionar algum tipo de instabilização.

Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato depósito de encosta

A unidade geotécnica Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato depósito de encostas abrange cerca de 0,05% da bacia do rio Forquilhas. É formada pelos solos de horizonte B incipiente cuja origem é da deposição gravitacional e pluvial de sedimentos do alto da encosta. Na bacia sua ocorrência está em relevo suave ondulado na transição da encosta para a planície de sedimentação.

A origem coluvionar é pouco significativa para os solos desta área, sendo o substrato mais encontrado os sedimentos aluvionares. Devido a posição no relevo podem ser de mal a muito mal drenado, desta forma deve-se ter cuidado com relação ao nível de água.

Apresenta erodibilidade moderada a elevada.

Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato tonalito

Esta unidade geotécnica está presente em 0,27% da área da bacia. Há poucas informações levantadas sobre esta unidade. Apresenta de moderada a elevada erodibilidade, sendo que a alteração na geometria do talude, decorrente da erosão de sua face, pode ocasionar sua ruptura.

Esta unidade apresenta baixa resistência do solo, porém a baixa declividade dos taludes contribui com a estabilidade de algumas áreas.

Gleissolo de substrato sedimentos quaternários

A unidade geotécnica Gleissolo de substrato sedimentos quaternários está presente em cerca de 22,65% da área da bacia do rio Forquilhas e é encontrada nas regiões mais baixas e planas.

O termo Glei indica intensa redução de ferro durante o desenvolvimento do solo sob condições de má drenagem ou alagamento. As cores destes solos na bacia de estudo são próximas às neutras (cinzas e pretas), correspondendo à ausência de ferro e podem apresentar-se com mosqueados ou não.

Tratam-se de solos mal ou muito mal drenados, com forte gleização.

Este tipo de solo corresponde às clássicas argilas moles (hidromórficas ou não) estudadas pela geotecnia. O horizonte A desta unidade é escuro e relativamente espesso, enquanto que o horizonte Glei, que ocorre abaixo do horizonte A, apresenta uma camada de cor acinzentada, ou variegada, com ou sem mosqueado.

De uma forma geral, esta unidade apresenta elevada deformação (por adensamento) e baixa resistência ao cisalhamento não drenada (condição UU) quando solicitada por esforços mecânicos.

Apesar de não terem sido executados ensaios de adensamento neste tipo de solo, diversos estudos desenvolvidos com as argilas moles minerais da região costeira do estado de Santa Catarina apontam para um comportamento normalmente adensado (NA) de amostras coletadas no horizonte Glei deste tipo de unidade, tal qual descrito por Higashi (2006).

A ocupação dessas áreas deve ser criteriosa, pois nesses locais podem surgir intercalações de camadas silto-argilosas com camadas arenosas, ocorrendo, frequentemente níveis de solos orgânicos de baixa capacidade de suporte ($N_{spt} < 4$) entre as mesmas.

Para o uso e ocupação desta unidade sugere-se que para estimar os recalques dos aterros e fundações de edificações é necessário que, além das sondagens do tipo SPT, sejam executados ensaios de adensamento para a definição dos parâmetros de compressibilidade, sobretudo do coeficiente de compressão (cc), uma vez que esta unidade corresponde a argilas normalmente adensadas (NA).

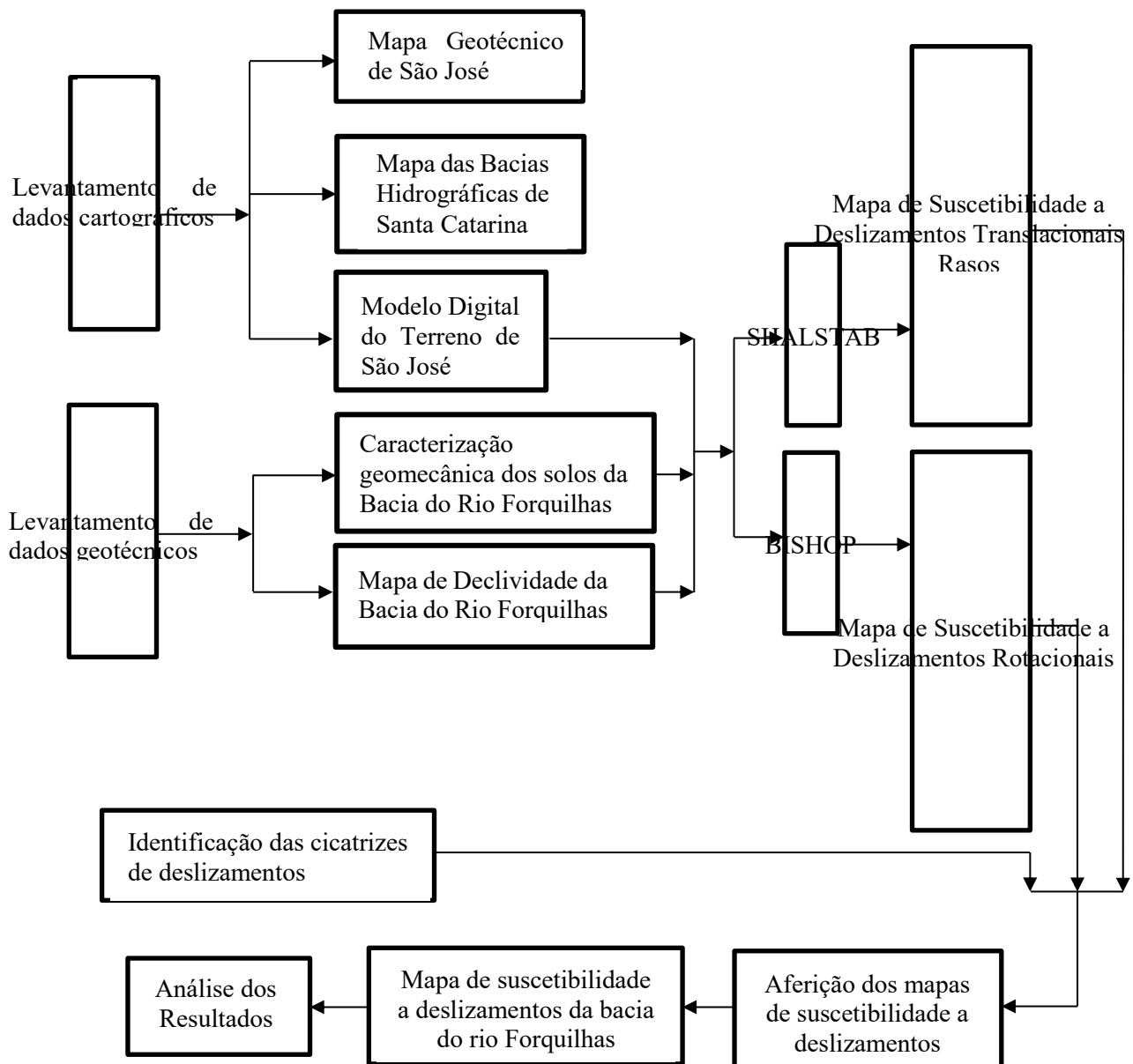
Esta unidade apresenta baixa permeabilidade e nível do lençol freático próximo à superfície (solo saturado). Desta forma, para as cargas da engenharia que solicitam mecanicamente o solo de forma imediata, tal qual aterros rodoviários, deve ser avaliada a resistência não drenada. Sugere-se que os ensaios de compressão triaxial na condição UU (Não consolidado não drenado) sejam executados para a determinação dos parâmetros de resistência.

Ressalta-se que caso não seja investigado o solo para a execução de obras de engenharia, é possível que ocorram sérios problemas de rupturas e consideráveis recalques de fundações com retificações extremamente onerosas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa foi estruturada a partir do método esquematizado no fluxograma da Figura 13, o qual será explicado nos itens deste capítulo.

Figura 13 - Fluxograma do método aplicado na pesquisa



Fonte: Autora.

4.1 OBTENÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

Para iniciar a elaboração deste trabalho, primeiramente foi realizada uma busca por materiais que servirão de fundamento à pesquisa. Neste quesito, enquadram-se mapas e imagens de satélite do município de São José (SC).

O mapa geotécnico do município de São José (SC) foi elaborado pelo Laboratório de Mapeamento Geotécnico (LAMGEO) da UFSC em 2015 seguindo os preceitos da metodologia proposta por Dias (1995). O mapa é constituído por 12 unidades geotécnicas, além de apresentar áreas que sofreram alterações devido a ações antrópicas, como aterros e área urbanizada. O mapa, o qual está representado na Figura 14, está georreferenciado no Datum SIRGAS 2000 zona 22S e apresenta escala 1:10.000.

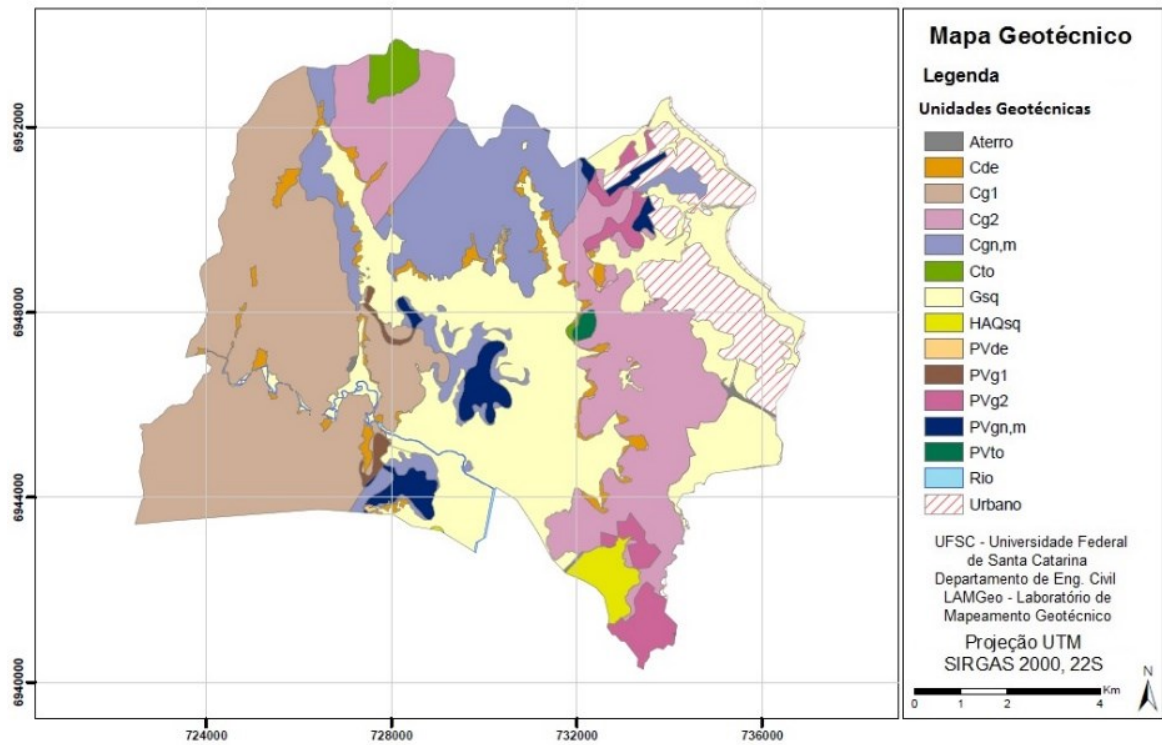
O mapa das bacias hidrográficas do estado de Santa Catarina foi disponibilizado pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri). O mapa contém todas as bacias hidrográficas do estado e, com isso, foi obtida a bacia do rio Forquilhas. O mapa fornecido, o qual está representado na Figura 15 apresenta escala 1:50.000 e está georreferenciado no Datum SAD69 zona 22S. O Mapa Digital das Unidades Hidrográficas do Estado de Santa Catarina é fruto da cooperação técnica entre a Epagri e a Diretoria de Recursos Hídricos da Secretaria do Desenvolvimento Sustentável (SDS).

O modelo Digital do Terreno (MDT) do município de São José foi disponibilizado pelo Departamento de Geociências da UFSC e apresenta escala 1:10.000 e está georreferenciado no Datum WGS84/UTM zone 22S, sendo que seus *pixels* possuem 1 metro de lado. O MDT consiste em um dos principais insumos para o desenvolvimento desta pesquisa. Isto se explica pelo fato de que por meio dele, diversos outros mapas são gerados, como o mapa de curvas de nível, mapa hipsométrico (relevo), mapa de declividades, mapa de direção de fluxo (escoamento das chuvas), entre outros.

Além dos mapas citados, para a realização deste trabalho foram utilizadas imagens de satélite advindas do *software* Google Earth, obtidas pelos satélites Landsat e Copernicus, e georreferenciadas no Datum WGS84 zona 22S. e do *software* ArcGIS, por meio da plataforma Basemap, cujas imagens são fornecidas pelos satélites GeoEye, IKONOS, AeroGRID e IGN Spain.

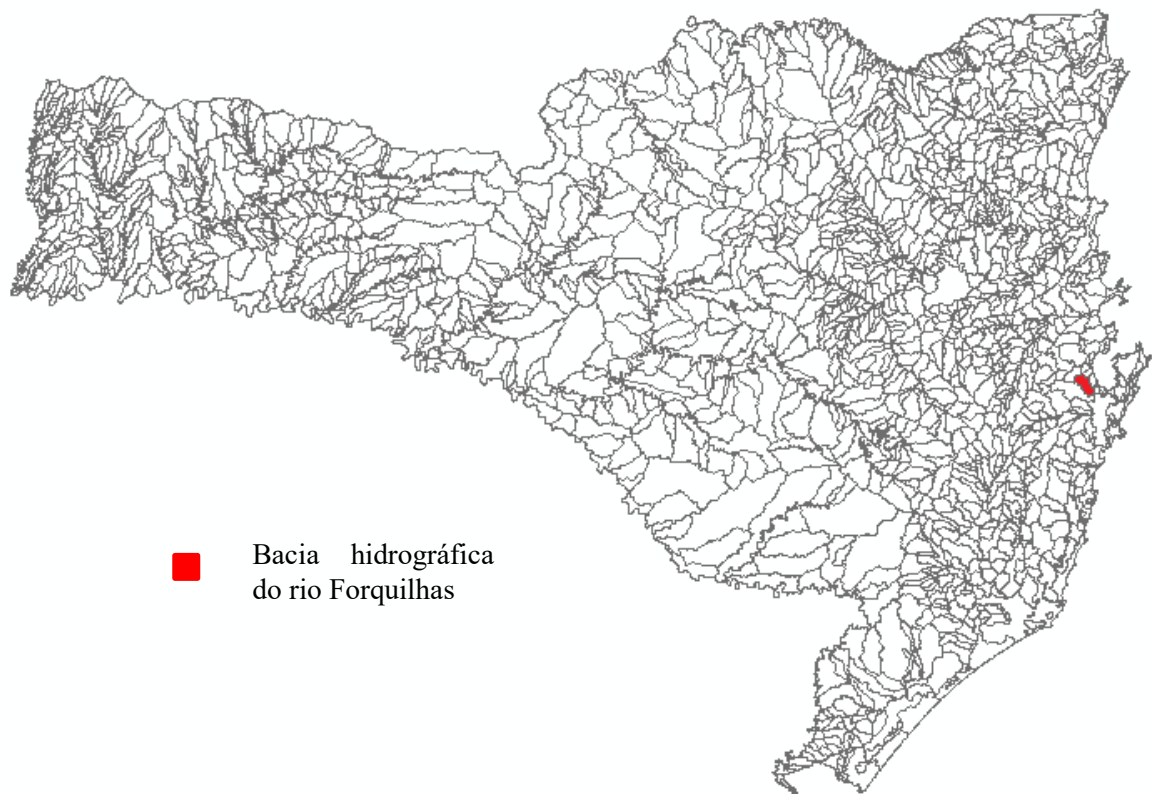
Ademais, a caracterização geomecânica dos solos que compõem o município de São José foi fornecida pelo LAMGEO, informações estas que são subsídio para as análises que foram realizadas nesta pesquisa.

Figura 14 - Mapa geotécnico do município de São José, SC



Fonte: LAMGEO (2015)

Figura 15 - Bacias hidrográficas de Santa Catarina



Fonte: Epagri

4.1.1 Transferência dos Arquivos para Ambiente SIG

Na realização desta pesquisa, o *software* de ambiente SIG que será utilizado consiste no ArcGIS, da empresa Esri. Para serem inseridos em SIG, devem ser georreferenciados os arquivos em formato *shapefile*.

O georreferenciamento dos arquivos é feito por meio das ferramentas de gestão de dados presentes no *software*. Alguns dos mapas adquiridos encontravam-se referenciados no Datum SAD69/UTM zona 22S, enquanto que os demais estavam referenciados no Datum WGS84/UTM zone 22S. Entretanto, desde 25 de fevereiro de 2015, o SIRGAS2000 passou a ser o único sistema geodésico de referência oficialmente adotado no Brasil. Dessa forma, foi realizada a conversão do Datum de todos os arquivos para o padrão utilizado no Brasil: SIRGAS2000/UTM zona 22S.

Conforme mencionado no item anterior, o mapa geotécnico e o modelo digital do terreno obtidos para esta pesquisa referem-se ao município inteiro. Dessa forma, a bacia hidrográfica do rio Forquilhas foi isolada das demais bacias presentes no mapa das bacias hidrográficas do estado de Santa Catarina e, a partir desta bacia, realizou-se o corte dos referidos mapas. Assim, foram gerados o mapa geotécnico da bacia do rio Forquilhas, o qual pode ser observado na Figura 11, e o Modelo Digital do Terreno da bacia do rio Forquilhas, o qual é apresentado na Figura 16.

O mapa de declividade, exposto na Figura 17, foi obtido a partir do MDT. As classes de relevo usadas na classificação das declividades, expostas no Quadro 7, foram baseadas no Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos da Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária).

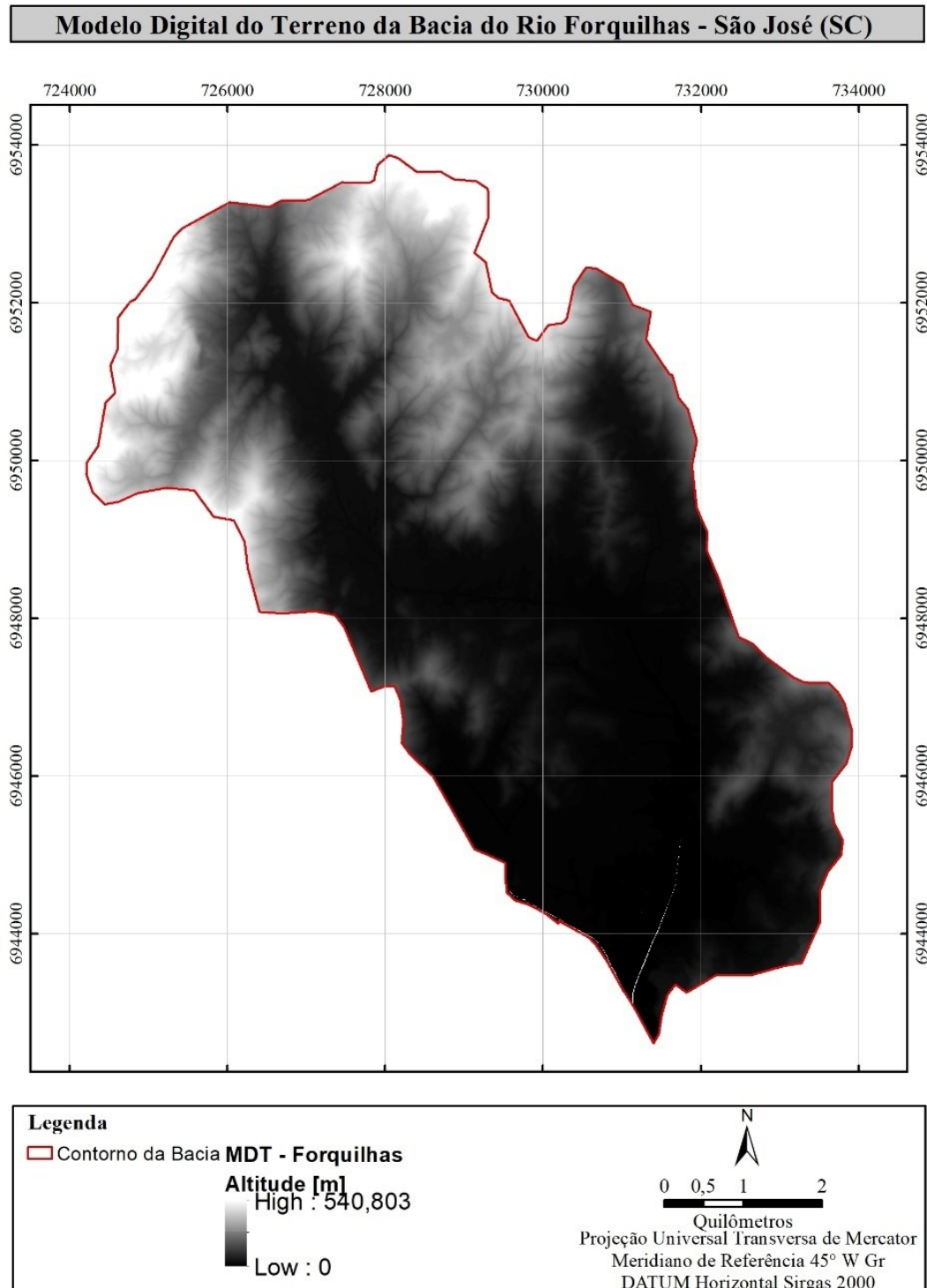
Quadro 7 - Classes de relevo baseado no Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos

Classe de Relevo	Declividade (%)
Plano	0 a 3
Suave ondulado	3 a 8
Ondulado	8 a 20
Forte ondulado	20 a 45
Montanhoso	45 a 75
Escarpado	Maior que 75

Fonte: Modificado de Embrapa (1999)

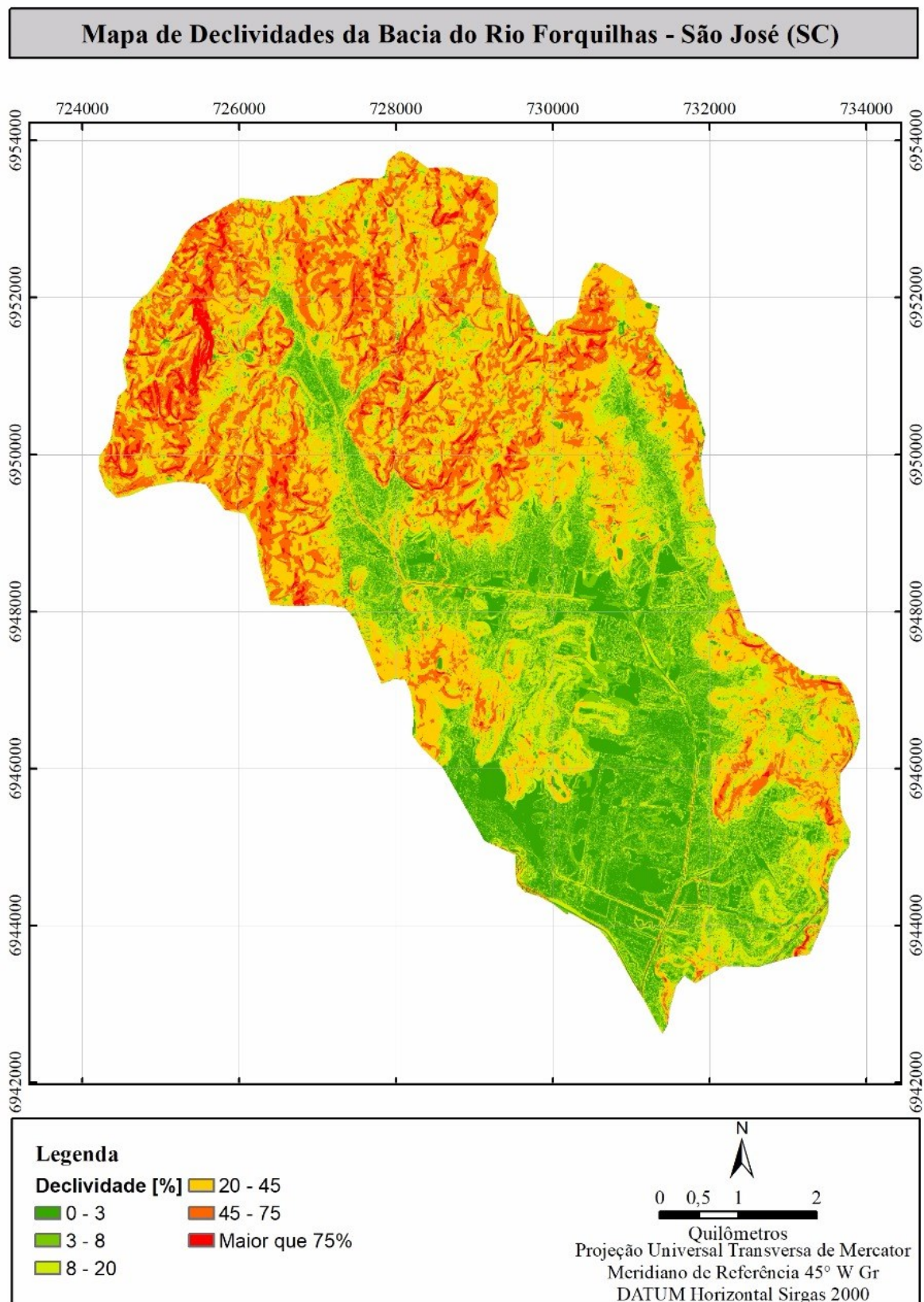
Na região noroeste da bacia do rio Forquilha, destaca-se a predominância das classes de relevo forte ondulado, montanhoso e escarpado, onde estão localizadas as maiores declividades. Na região centro-sul e ao longo da área da unidade Gleissolo de substrato quaternário destaca-se a predominância dos relevos plano e suave plano.

Figura 16 - Modelo Digital do Terreno da bacia do rio Forquilha



Fonte: Autora.

Figura 17 - Mapa de declividades da bacia do rio Forquilhas



Fonte: Autora.

4.2 MAPA DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS

A estimativa das áreas suscetíveis a deslizamentos da bacia do rio Forquilhas foi realizada por meio da aplicação do modelo SHALSTAB e pelo método de Bishop, o qual é baseado na teoria do equilíbrio limite.

Entretanto, destaca-se que existe uma diferença entre as áreas estimadas pelos dois modelos. Enquanto o modelo SHALSTAB estima as áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos, com superfície de ruptura planar, o modelo de Bishop estima deslizamentos rotacionais, com superfície de ruptura circular.

Assim, é possível identificar as áreas suscetíveis a deslizamentos das duas formas mais recorrentes, alcançando-se uma estimativa mais completa.

4.2.1 Mapa gerado pelo Modelo SHALSTAB

Para simplificar a aplicação do modelo, Michel (2013) desenvolveu um algoritmo que pode ser aplicado no software ArcMap. O principal objetivo do autor foi inserir mais duas variáveis na equação do SHALSTAB, uma de coesão de raízes e outra de peso de vegetação. Com esse algoritmo, tem-se a possibilidade de tornar espaciais os parâmetros geotécnicos em função das respectivas unidades geotécnicas que forem encontradas na área de estudo.

Michel (2013) afirma que a coesão de raízes, que contribui para elevar a resistência ao cisalhamento do solo, atua somente até uma profundidade de 3m, sendo que a partir desta profundidade o valor da coesão de raízes tende a zero.

O algoritmo consiste na aplicação das equações do modelo SHALSTAB em ambiente SIG, onde mapas da área de estudo em formato matricial correspondem às variáveis das equações.

Com a finalidade de facilitar a aplicação do modelo, tornar o processo mais célere, eliminar a possibilidade de erro humano nas etapas do processo e possibilitar a iteração por meio da alteração de parâmetros de forma ágil, Sbroglia *et al.* (2017) desenvolveram uma ferramenta que automatiza o modelo SHALSTAB no ArcGIS. A ferramenta é chamada de *Automatic SHALSTAB Analysis* (ASA).

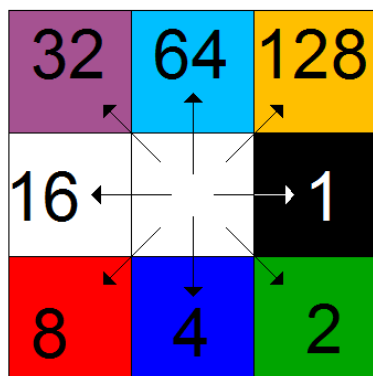
Dessa forma, esta pesquisa faz uso da ferramenta, visto todas as vantagens oferecidas por ela. A ASA é inserida no *Toolbox* do ArcGIS e o processamento do algoritmo do SHALSTAB pode ser realizado por meio de duas técnicas:

- Técnica ASA – Oito direções;
- Técnica ASA – Infinitas direções.

A diferença entre as técnicas consiste na quantidade de vetores de direção de fluxo, um dos atributos do modelo.

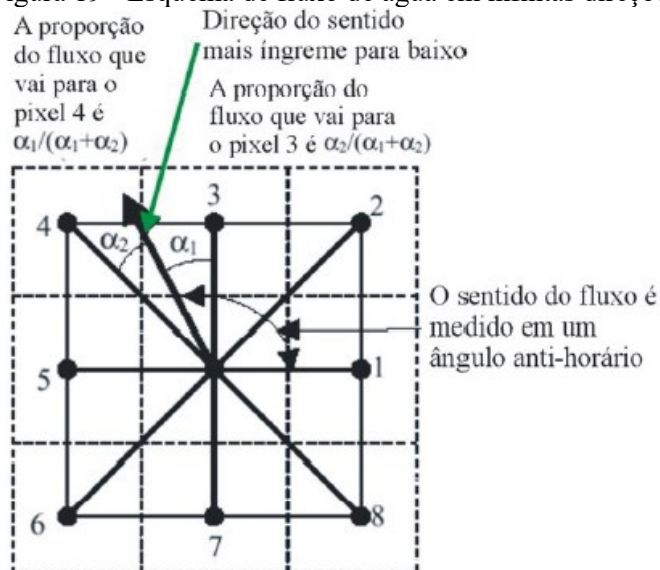
A direção de fluxo representa a direção do escoamento da água analisando-se as células vizinhas do MDT. Na camada por oito direções, a direção é obtida a partir do valor de altitude das células vizinhas (pixels do MDT), conforme pode ser observado na Figura 18; e por infinitas direções, a partir da faceta triangular mais íngreme do pixel. Assim, neste caso, o fluxo pode abastecer mais de uma célula e se divide entre elas em função dos ângulos que as contemplam, conforme pode ser observado na Figura 19 (CARVALHO *et al.*, 2010).

Figura 18 - Vetores de direção de fluxo (8 direções)



Fonte: Bortoloti (2013), adaptado pela autora.

Figura 19 - Esquema de fluxo de água em infinitas direções



Fonte: Carvalho *et al.* (2010).

Nesta pesquisa, optou-se pela utilização da Técnica ASA – Infinitas direções, uma vez que esta apresenta maior precisão na verificação de áreas instáveis. A Figura 20 apresenta os dados necessários para a execução da ferramenta ASA na técnica escolhida.

Figura 20 - Dados necessários para processar a ferramenta ASA pela técnica de infinitas direções

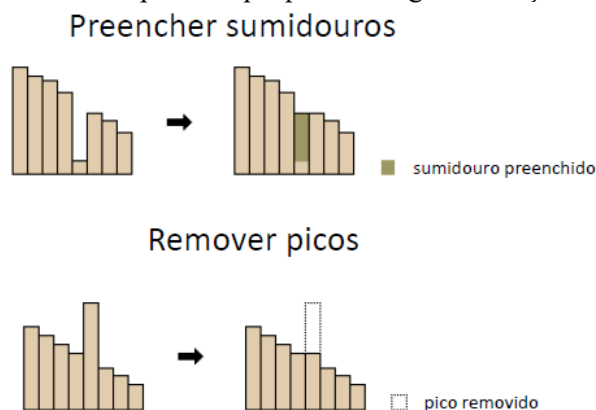
Fonte: Autora

Como pode-se observar na Figura 20, os dados de entrada são *Workspace*, *Inserir MDE*, *Inserir camada Geotécnica* e *ab.tif*.

De acordo com Sbroglia *et al.* (2017), o campo *Workspace* consiste no endereço da pasta onde serão desenvolvidos os cálculos do modelo.

No campo *inserir MDE* foi inserido o Modelo Digital de Elevação (MDE). O MDE utilizado consiste no MDT contendo a correção das discrepâncias (picos e sumidouros – Figura 21) que podem surgir quando o mesmo é gerado. Tais discrepâncias podem afetar a análise da distribuição do fluxo d'água e, por isso, devem ser corrigidas.

Figura 21 - Discrepâncias que podem surgir na criação do MDT

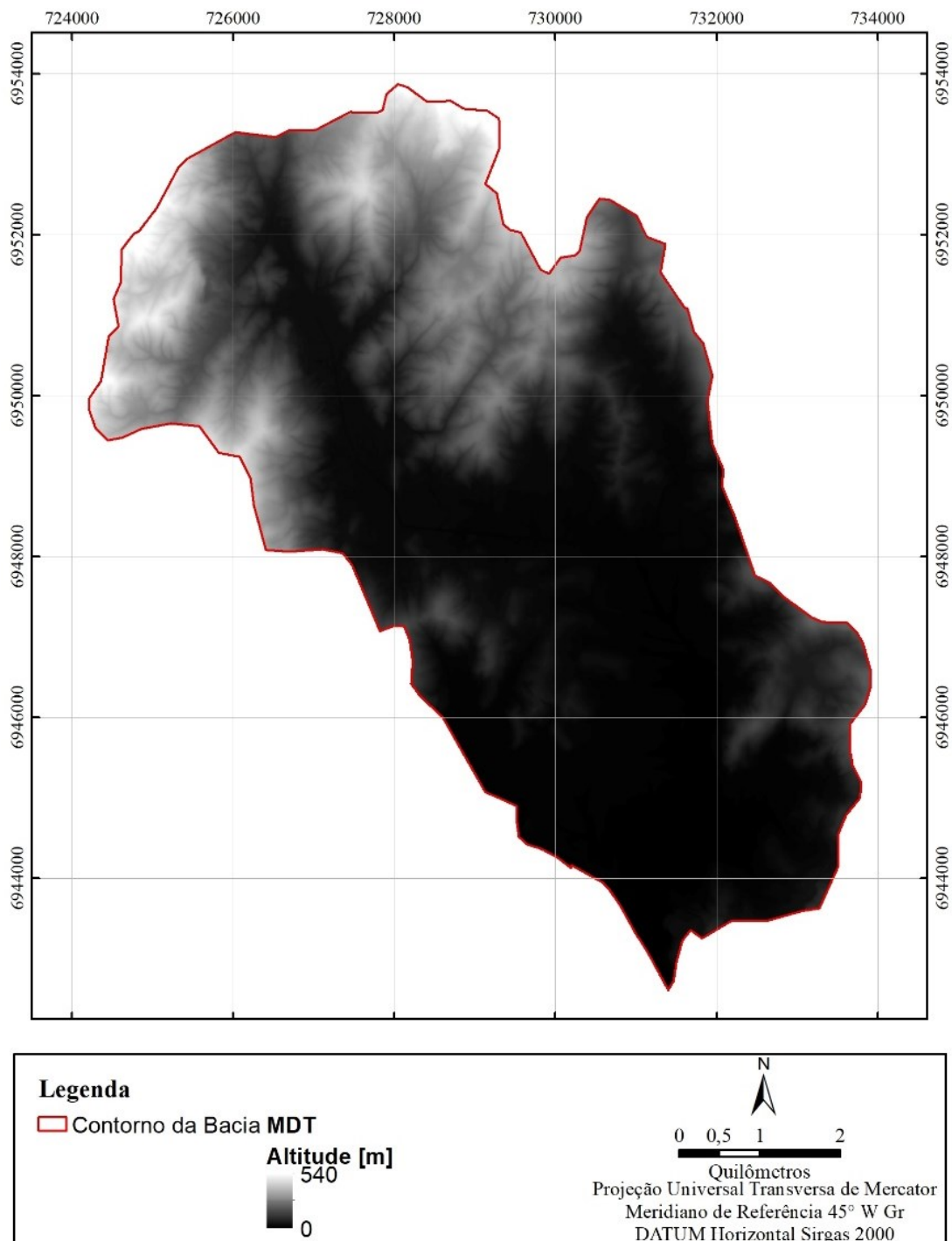


Fonte: Bortoloti (2013)

Assim, o MDE foi gerado utilizando-se o *software* ArcGIS fazendo-se uso da ferramenta *fill*, no menu *Hidrology*, tomando-se como base o MDT da bacia.

A Figura 22 apresenta o referido mapa, na escala 1:10.000.

Figura 22 - Modelo Digital de Elevações da bacia do rio Forquilhas



Fonte: Autora.

No campo *Camada Geotécnica*, por sua vez, é inserido o mapa geotécnico da bacia do rio Forquilhas contendo como atributo parâmetros da caracterização dos solos que compõem a bacia e parâmetros de resistência dos solos, além das variáveis coesão de raízes e carga proveniente de vegetação, ambas adicionadas por Michel (2013).

Os referidos parâmetros são discriminados abaixo:

- Intercepto coesivo efetivo do solo (c'), em N/m^2 ;
- Ângulo de atrito interno efetivo do solo (ϕ'), em graus;
- Peso específico saturado do solo (γ_{sat}), em kg/m^3 ;
- Espessura do solo (z), em metros;
- Coesão de raízes (c_r), em N/m^2 ;
- Carga proveniente de vegetação (w), em kg/m^2 ;

Os valores dos parâmetros relacionados ao solo (c' , ϕ' e γ_{sat}) foram obtidos da pesquisa elaborada por LAMGEO (2015) e são apresentados no Quadro 8.

Quadro 8 - Parâmetros de caracterização e de resistência dos solos da bacia do rio Forquilhas

Unidade Geotécnica	c' [N/m^2]	ϕ' [graus]	γ_{sat} [kg/m^3]
Aterro	30.000	30	1.800
Cde	17.100	31	1.840
Cg1	15.800	30	1.710
Cg2	15.900	24	1.730
Cgn,m	9.700	29	1.760
Cto	8.200	29	1.780
Gsq	30.000	33	1.800
PVde	13.400	30	1.640
PVg1	15.800	30	1.710
PVg2	15.900	24	1.730
PVgn,m	13.200	24	1.760
PVto	8.200	29	1.780

Fonte: LAMGEO (2015).

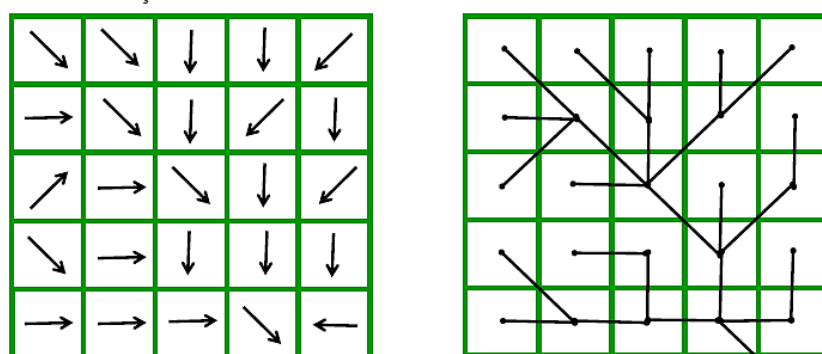
De acordo com Sbroglia *et al.* (2017), a espessura do solo (z) pode ser estimada com investigações *in situ* durante as saídas a campo, relatórios técnicos, referências bibliográficas, consulta aos técnicos ou elaboração de cenários com diferentes espessuras. Ainda, há a

possibilidade na ferramenta ASA da camada z ser um dado de entrada, assim, pode-se adicionar uma camada em formato matricial da espessura do solo espacializada.

Para o cenário analisado, foi considerada uma profundidade de ruptura de 5 metros, no limite entre deslizamentos rasos e profundos. Nessa profundidade, a coesão das raízes da vegetação das encostas não influencia significativamente a resistência ao deslizamento e, por isso, serão consideradas igual a zero.

Por fim, no campo *ab.tif* é inserido o mapa de contribuição (área de contribuição por comprimento de contorno unitário), o qual consiste na criação de uma superfície de acúmulo de fluxo a partir da direção de fluxo, conforme apresentado na Figura 23.

Figura 23 - Criação de uma superfície de acúmulo de fluxo a partir das direções de fluxo



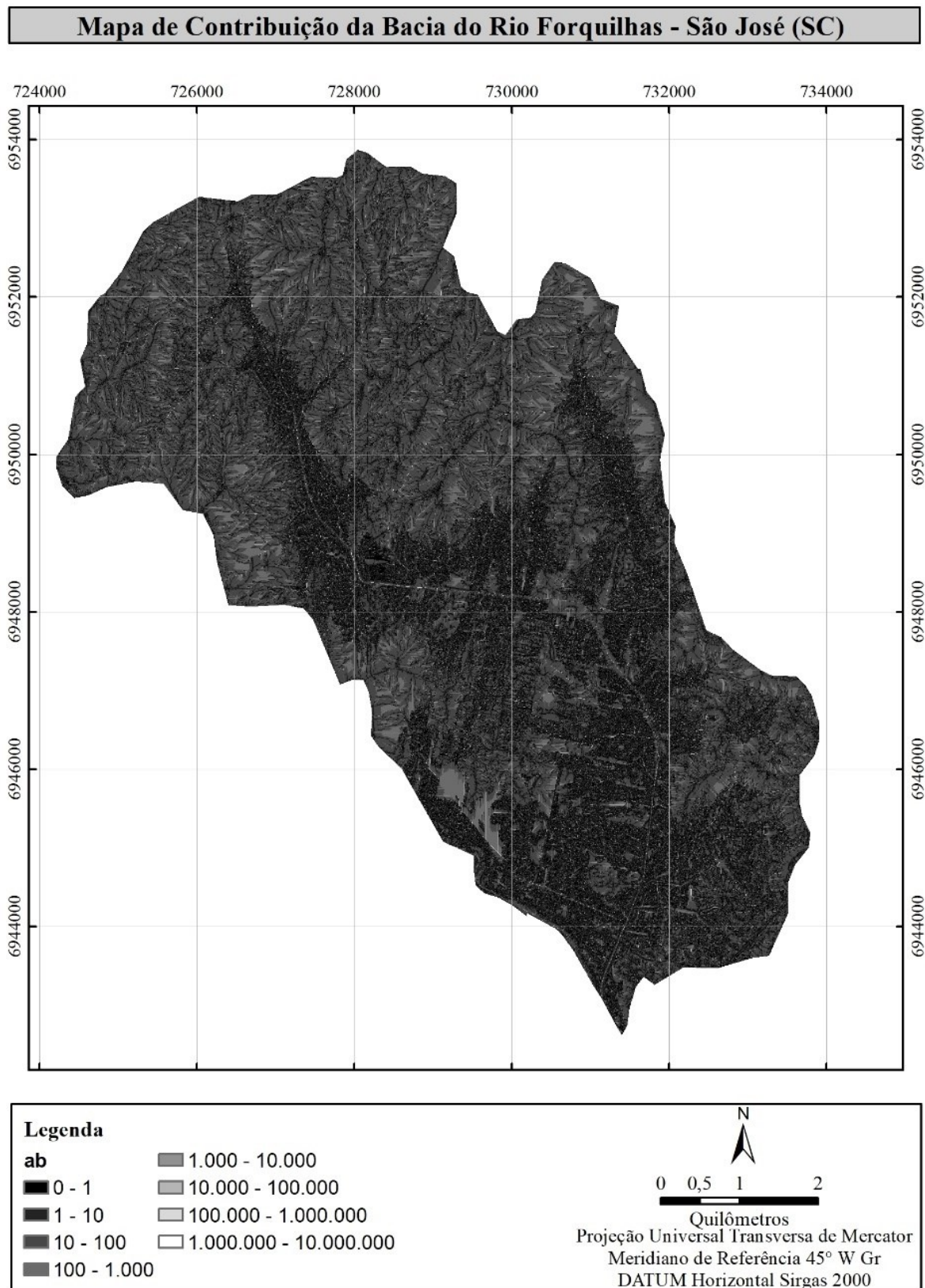
Fonte: Bortoloti (2013).

Dessa forma, é gerada a rede de acumulação de fluxo, formando a rede de drenagem da bacia hidrográfica do rio Forquilhas.

Para a elaboração do mapa, foi utilizada a ferramenta de acumulação de fluxo do TauDEM (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Models* – Análise do terreno usando Modelo Digital de Elevação), desenvolvida pelo Grupo de Pesquisa Hidrológica da Utah State University (Estados Unidos) (TARBOTON, 2003), tomando-se como base o mapa de direções de fluxo da bacia do rio Forquilhas.

O mapa de contribuição é apresentado na Figura 24, com escala de detalhamento 1:10.000.

Figura 24 - Mapa de Contribuição da bacia do rio Forquilhas



Fonte: Autora.

Dessa forma, após a elaboração de todas as informações necessárias, a ferramenta ASA pode ser executada. O resultado obtido após o processamento da ferramenta corresponde ao mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos da bacia do rio Forquilhas.

4.2.2 Mapa gerado pelo Modelo Bishop

A verificação da estabilidade de taludes de forma isolada é regulamentada pela norma NBR 11682 (ABNT, 2009). De acordo com esta NBR, o Fator de Segurança mínimo a ser adotado deve ser estipulado de acordo com o Quadro 9.

Quadro 9 - Fatores de Segurança mínimos para deslizamentos

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Nível de segurança contra danos a vidas humanas		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Fonte: NBR 11682 (ABNT, 2009).

Os Fatores de Segurança mínimos adotados pela norma NBR 11682 (ABNT, 2009) dependem dos riscos envolvidos em cada situação analisada e, portanto, inicialmente deve-se enquadrar cada caso em uma das seguintes classificações de nível de segurança, as quais são definidas a partir da possibilidade de perda de vidas humanas (Quadro 10) e de danos materiais e ambientais (Quadro 11).

Quadro 10 - Nível de segurança desejado contra perdas de vidas humanas

Nível de Segurança	Critérios
Alto	Áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residenciais ou industriais, estádios, praças e demais locais, urbanos ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego intenso
Médio	Áreas e edificações com movimentação e permanência restrita de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego moderado
Baixo	Áreas e edificações com movimentação e permanência eventual de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego reduzido

Fonte: NBR 11682 (ABNT, 2009).

Quadro 11 - Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais

Nível de Segurança	Critérios
Alto	<p>Danos materiais: Locais próximos a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetem serviços essenciais</p> <p>Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais graves, tais como nas proximidades de oleodutos, barragens de rejeito e fábricas de produtos tóxicos</p>
Médio	<p>Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor moderado</p> <p>Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais moderados</p>
Baixo	<p>Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor reduzido</p> <p>Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos</p>

Fonte: NBR 11682 (ABNT, 2009).

Conforme visto na Figura 9, apenas a porção centro-sul da bacia encontra-se em estágio de urbanização elevada. Tais áreas estão concentradas em regiões planas e, portanto, não sofrem de forma direta os impactos gerados pela movimentação de encostas. As encostas estão concentradas nos bordos da bacia, em sua região norte e noroeste da mesma.

Portanto, de acordo com o Quadro 10, o nível de segurança contra perdas de vidas humanas pode ser considerado baixo, pois não é muito habitada. Por este mesmo motivo, conforme o Quadro 11, o nível de segurança contra danos materiais e ambientais também é considerado baixo.

Entretanto, sabendo-se que expansões da área urbanizada podem ocorrer no futuro, considerou-se os fatores de segurança das encostas da região para os três níveis de segurança contra perdas de vidas humanas.

Sendo assim, conforme o Quadro 9, os fatores de segurança adotados na análise das encostas da bacia do rio Forquilhas foram:

- Grau de segurança alto: $FS = 1,4$;
- Grau de segurança médio: $FS = 1,3$;

- Grau de segurança baixo: $FS = 1,2$.

Portanto, para esta pesquisa adotou-se valores de FS menores que 1,2 para classificar a encosta como instável e valores de FS maiores que 1,4 para considerar a encosta estável.

Para o cálculo do FS , utilizou-se um *software* de estabilidade de encostas, o MacStars da empresa Maccaferri. Neste *software*, foi necessário estabelecer previamente a geometria dos taludes. Como dado de entrada, foram inseridas as propriedades do solo, coletados no horizonte C do talude de cada unidade geotécnica que compõe a bacia do rio Forquilhas. Os parâmetros necessários são:

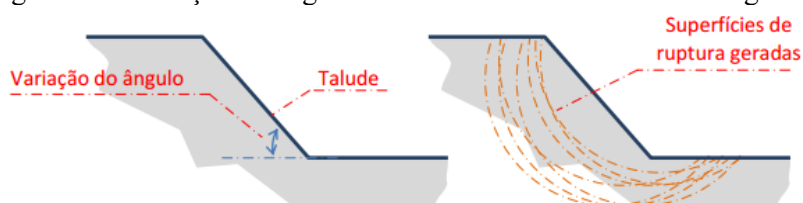
- Intercepto coesivo do solo, em kPa;
- Ângulo de atrito interno do solo, em graus;
- Peso específico saturado do solo, em kN/m^3 .

Os valores desses parâmetros foram obtidos da pesquisa elaborada por LAMGEO (2015) e estão apresentados no Quadro 8.

Considerou-se o solo saturado nas análises realizadas pois apresenta valores menores de FS . Isso se deve ao fato de que o aumento do percentual de água no solo provoca um aumento do peso, diminui a coesão entre as partículas e provoca o aumento da poropressão. Assim, simulando o cenário mais desfavorável, foi calculado o FS para o talude saturado, considerando o nível d'água 5 metros abaixo da superfície. A elevação do nível d'água nestas condições aumenta as pressões neutras, reduzindo as tensões normais efetivas e a resistência ao cisalhamento, podendo levar os taludes à ruptura.

Para o cálculo do FS foram adotadas superfícies de ruptura circulares. Foram realizados os cálculos do FS no *software* para as declividades de 15° , 20° , 25° , 30° e 35° , conforme indicado na Figura 25.

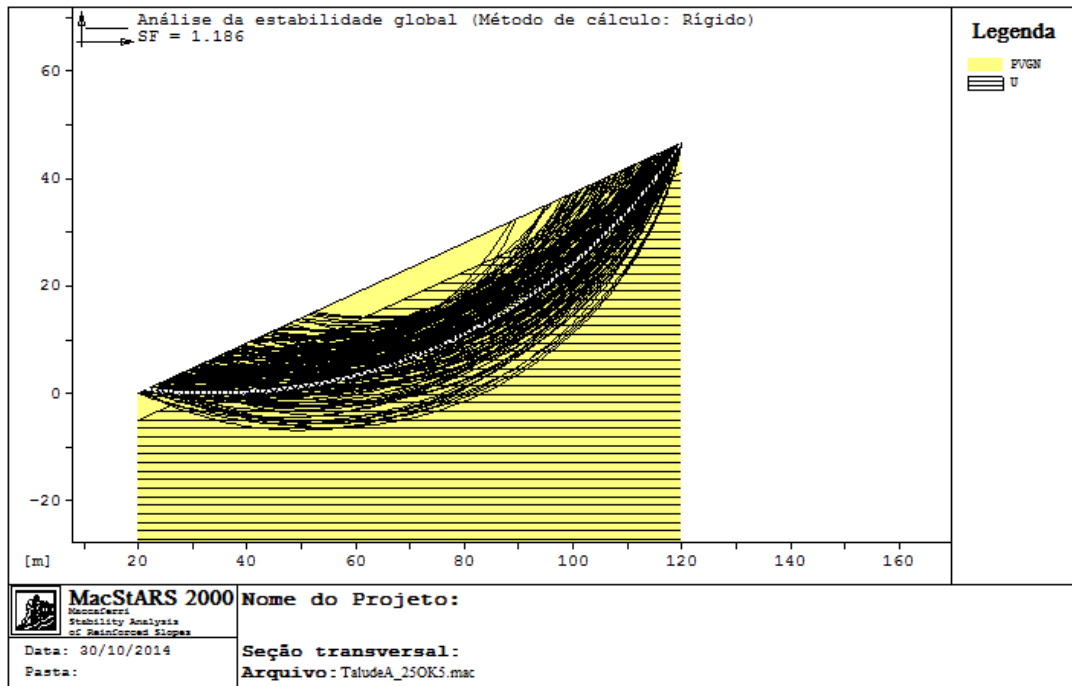
Figura 25 - Variação do ângulo da encosta e teste do Fator de Segurança



Fonte: LAMGEO (2015).

Um exemplo do processamento dos dados no *software* MacStars é apresentado na Figura 26, no qual é possível observar as diversas superfícies de ruptura simuladas pelo *software*. A superfície em branco é a superfície mais instável.

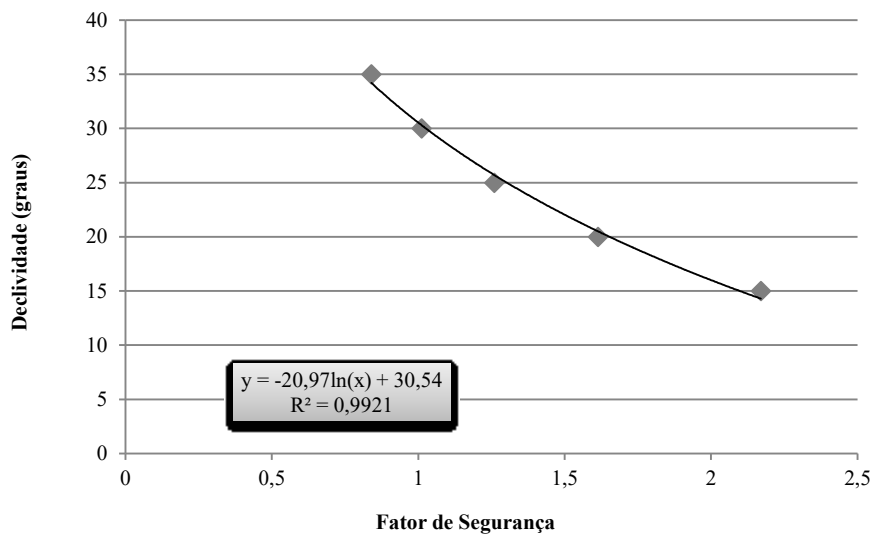
Figura 26 - Superfícies de ruptura traçadas no talude pelo software utilizando o método de Bishop



Fonte: Autora.

Após a execução de todas as simulações realizadas com os taludes de diferentes inclinações para as diferentes unidades geotécnicas foi construído um gráfico do Fator de Segurança obtido em cada simulação correlacionado com a declividade do talude analisada. A partir dos pontos obtidos, foi elaborada a linha de tendência logarítmica com o referido coeficiente de correlação (R^2), conforme exemplificado na Figura 27.

Figura 27 - Exemplo de correlação obtida entre a declividade do talude e o Fator de Segurança



Fonte: Autora.

Dessa forma, a partir da correlação obtida, são determinados os valores da declividade do talude que produz um Fator de Segurança igual a 1,2 e 1,4, respectivamente.

Portanto, a partir destes valores, é feita a reclassificação dos limites do mapa de declividades da bacia do rio Forquilhas, o qual é gerado a partir do MDT da área. O resultado da reclassificação representa as áreas suscetíveis a deslizamentos rotacionais da área de estudo.

Entretanto, ressalta-se que este método não é o mais indicado para estimar as áreas suscetíveis a deslizamentos rotacionais, uma vez que o método analisa a área de forma global, não sendo muito indicado para estimar a segurança local, sendo necessária a aplicação da NBR 11682 (ABNT, 2009) para cada caso pontual.

4.3 AFERIÇÃO DOS MAPAS DE SUSCETIBILIDADE

Os mapas de suscetibilidade a deslizamentos elaborados conforme o modelo SHALSTAB e conforme o método de Bishop, após serem elaborados, passaram por um processo de aferição das áreas classificadas como instáveis, a fim de validá-los.

Por meio de imagens de satélite da bacia do rio Forquilhas obtidas no *software* Google Earth, do período entre os anos de 2003 e 2018, as cicatrizes de deslizamentos de encostas que ocorreram no passado foram encontradas demarcadas. Exemplos de cicatrizes identificadas são apresentados na Figura 28.

Figura 28 - Identificação das cicatrizes de deslizamentos

a. Identificação.



b. Verificação.



c. Identificação.



d. Verificação.



Fonte: Google Earth, adaptado pela autora.

Esse procedimento foi executado com auxílio de SIG, por meio da interpretação e localização da cicatriz, onde traçou-se um polígono sobre a mesma afim de representá-la, tal como representado na Figura 29. No total, foram mapeadas 31 cicatrizes de deslizamentos na bacia do rio Forquilhas.

Figura 29 - Exemplo de delimitação de cicatrizes de deslizamentos no ArcGIS

a. Identificação.



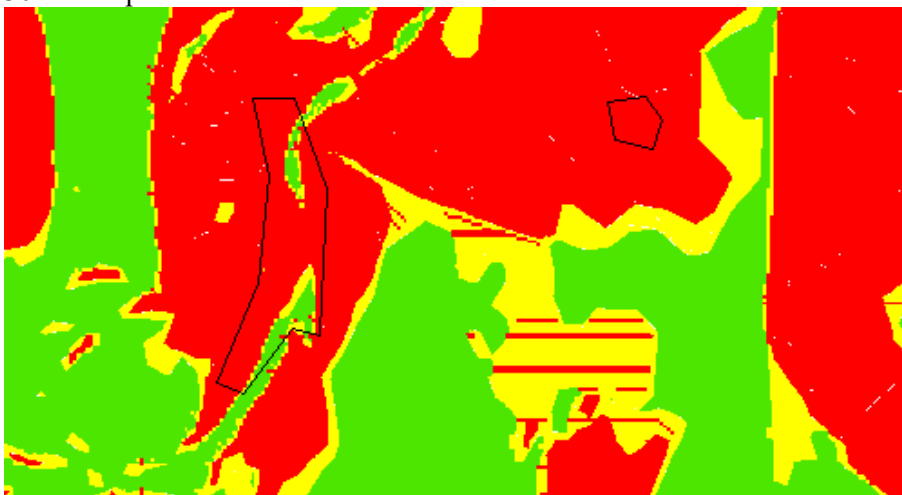
b. Delimitação.



Fonte: Autora

Com isso, fez-se a sobreposição das cicatrizes de deslizamentos nos mapas de suscetibilidade a deslizamentos gerados e, em seguida, as cicatrizes foram analisadas individualmente com o intuito de se determinar em qual classe de estabilidade ela se situa. Esse procedimento pode ser observado na Figura 30.

Figura 30 - Exemplo de cicatriz de deslizamento situada em área suscetível a deslizamentos



Fonte: Autora

Ao fim desse processo, obteve-se a distribuição percentual das cicatrizes por cada classe de estabilidade que compõe os mapas de suscetibilidade. Assim, verificou-se qual a localização predominante das cicatrizes com a intenção de aferir os mapas de suscetibilidade a deslizamentos da bacia do rio Forquilhas.

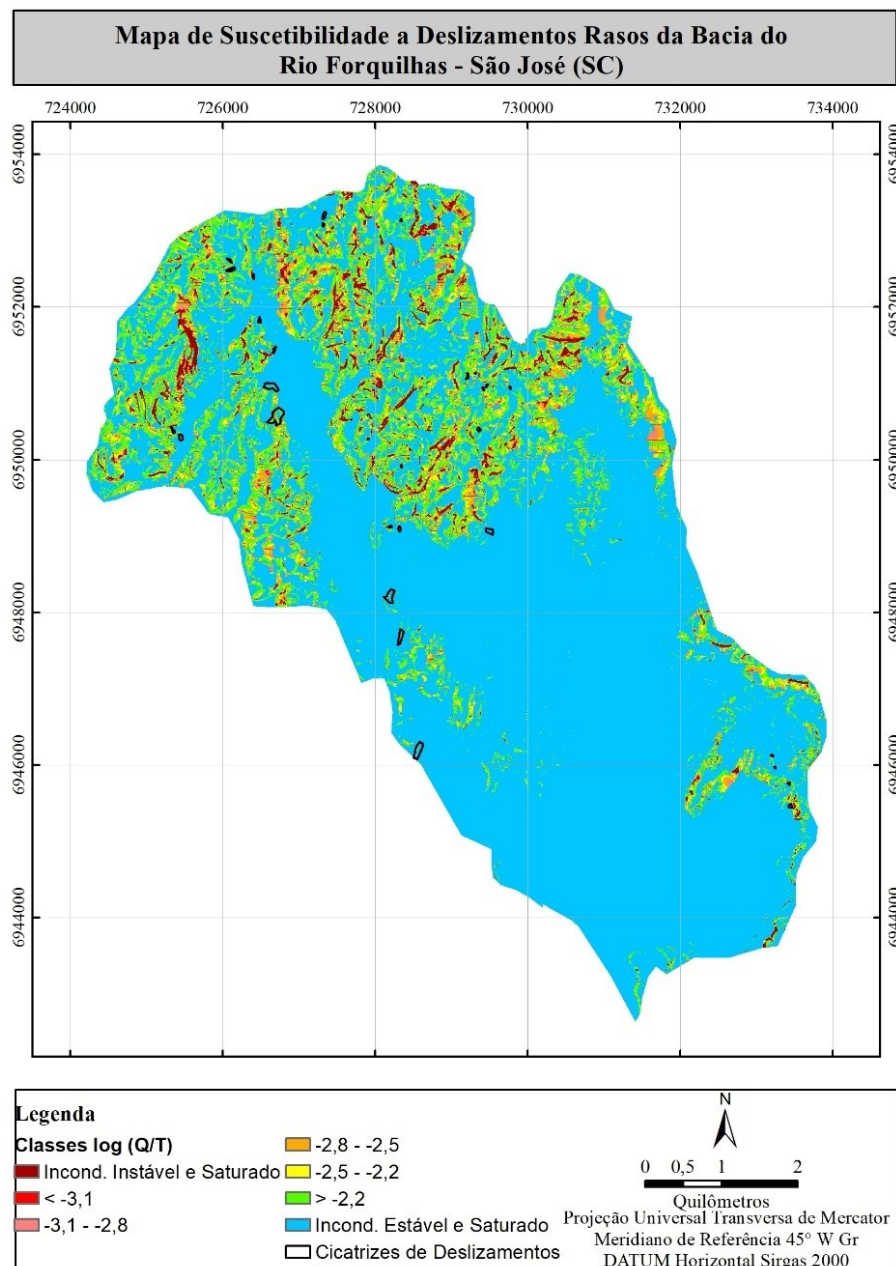
5 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados encontrados a partir da aplicação dos métodos descritos neste trabalho.

5.1 MAPA DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS TRANSLACIONAIS RASOS

O mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos da bacia do rio Forquilhas está apresentado na Figura 31, com escala de detalhamento 1:10.000.

Figura 31 - Mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos da bacia do rio Forquilhas



Fonte: Autora

A divisão das classes de estabilidade apresentadas no mapa da Figura 31 é mostrada no Quadro 12.

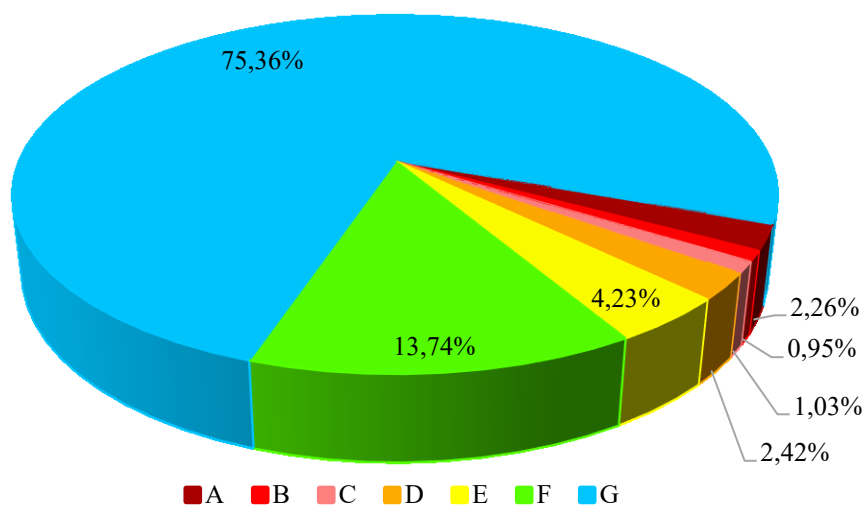
Quadro 5 - Divisão das classes de estabilidade segundo o modelo SHALSTAB e sua representação

	Classe de Estabilidade	Sigla	log (Q/T)	Representação
Instáveis	Incondicionalmente Instável e Não Saturado	A	-10 - -9,9	
	Incondicionalmente Instável e Saturado	B	-9,9 - -3,1	
	Instável e Saturado	C	-3,1 - -2,8	
	Instável e Não Saturado	D	-2,8 - -2,5	
Estáveis	Estável e Não Saturado	E	-2,5 - -2,2	
	Incondicionalmente Estável e Não Saturado	F	-2,2 - 9,9	
	Incondicionalmente Estável e Saturado	G	9,9 - 10	

Fonte: Autora

Na Figura 32 é apresentado um gráfico que mostra a distribuição espacial das classes de estabilidade na bacia do rio Forquilhas. Como pode-se perceber, aproximadamente 93% da área estudada situa-se em regiões classificadas como estáveis e apenas 7% em áreas instáveis, sendo 2,26% da área classificada na classe mais instável.

Figura 32 - Distribuição espacial das classes de estabilidade



Fonte: Autora

As unidades geotécnicas que apresentaram a maior parcela das áreas classificadas como instáveis segundo o modelo SHALSTAB foram a unidade Cambissolo de substrato granito São Pedro de Alcântara, Cambissolo de substrato granito Alto da Varginha e Cambissolo de

substrato gnaisse e migmatito. Isso se deve ao fato destas unidades apresentarem as classes de relevo mais acentuadas (maiores declividades).

Por outro lado, a unidade geotécnica Gleissolo de substrato sedimentos quaternários apresentou o maior contingente de áreas estáveis. Esse comportamento era esperado, pois a unidade situa-se nas classes de relevo mais planas (menores declividades).

De acordo com Guessier (2016), a representação do mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos por meio do padrão de cores semafórico facilita e simplifica a leitura do mapa. Dessa forma, as sete classes de suscetibilidade do modelo SHALSTAB são reclassificadas em três classes, sendo:

- Verde: segurança. Indicam regiões de baixa suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos;
- Amarelo: alerta. Indicam áreas que apresentam média suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos;
- Vermelho: perigo. Representam áreas de alta suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos.

Assim, a análise do mapa de suscetibilidade se torna mais intuitiva e acessível a toda população. No Quadro 13 é apresentado a equivalência entre os sistemas de representação das cores que representam as classes de suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos.

No padrão de representação semafórico adotado, a classe de alta suscetibilidade (vermelho) equivale às classes de risco A, B e C do modelo SHASLTAB. A classe de média suscetibilidade (amarelo) representa as classes de risco D e E e, por fim, a classe de baixa suscetibilidade (verde) equivale às classes de risco F e G do modelo SHALSTAB.

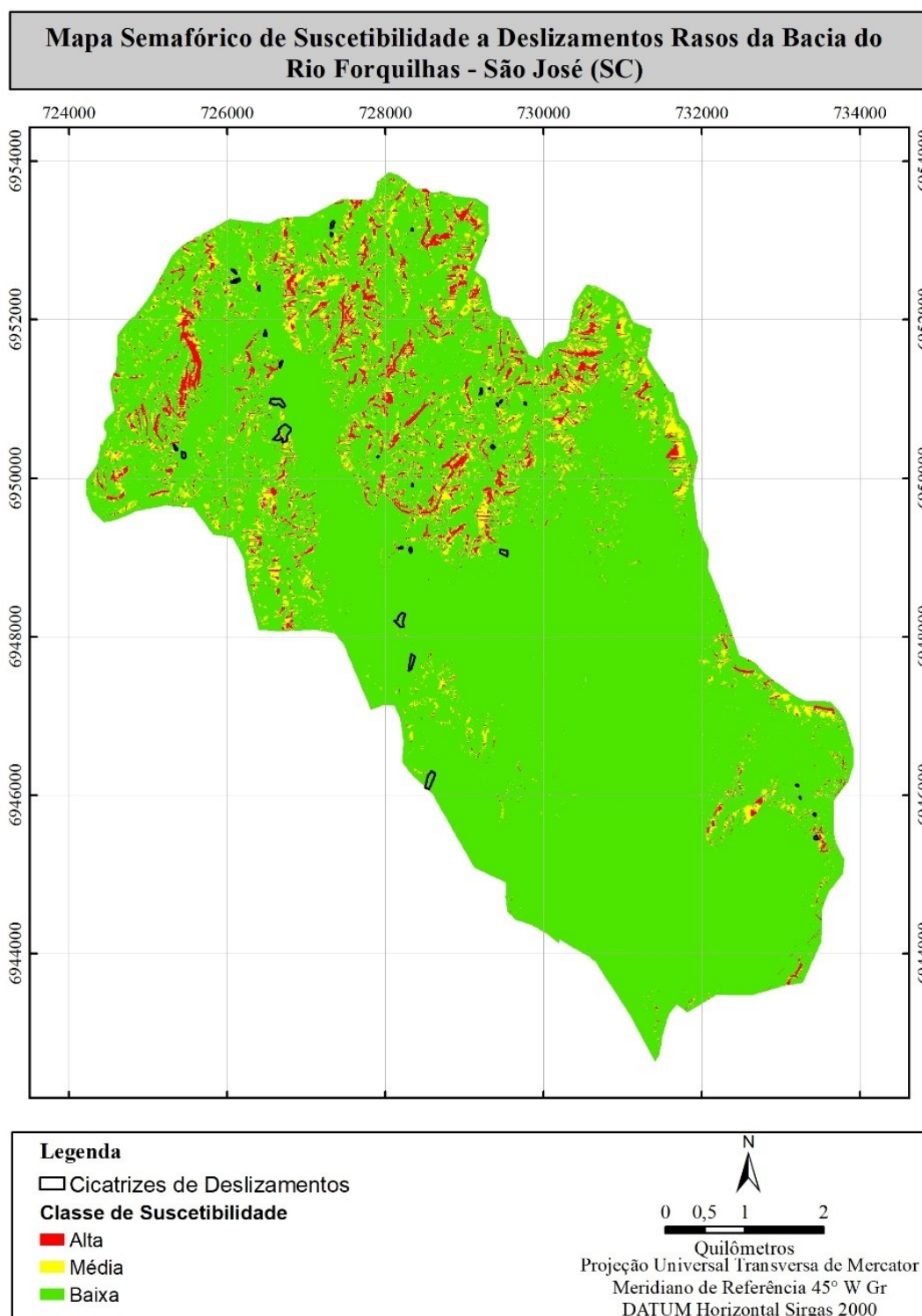
Quadro 6 - Equivalência entre os sistemas de classificação de suscetibilidade: padrões de representação

	Padrão SHALSTAB		Padrão Semafórico
	Sigla	log (Q/T)	
Instáveis	A	-10 - -9,9	Alto Risco
	B	-9,9 - -3,1	
	C	-3,1 - -2,8	
	D	-2,8 - -2,5	Médio Risco
Estáveis	E	-2,5 - -2,2	
	F	-2,2 - 9,9	Baixo Risco
	G	9,9 - 10	

Fonte: Autora

O mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos da bacia do rio Forquilhas seguindo a representação de cores semafóricas é apresentado na Figura 33.

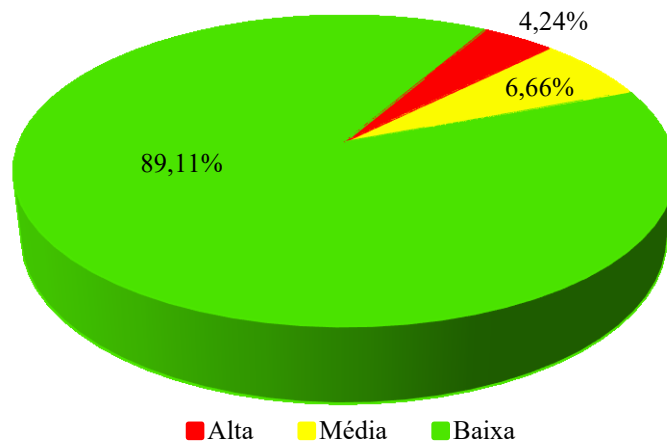
Figura 33 - Mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos da bacia do rio Forquilhas (padrão semafórico)



Fonte: Autora

Pode-se perceber a predominância de áreas verdes, classificadas como baixa suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos, conforme mostrado no mapa e no gráfico da Figura 34. Esse comportamento já era esperado, uma vez que o mapa da Figura 31 e o gráfico da Figura 32 mostram que as classes F e G ocupam cerca de 90% da área de estudo.

Figura 34 - Distribuição espacial das classes de estabilidade (padrão semafórico)



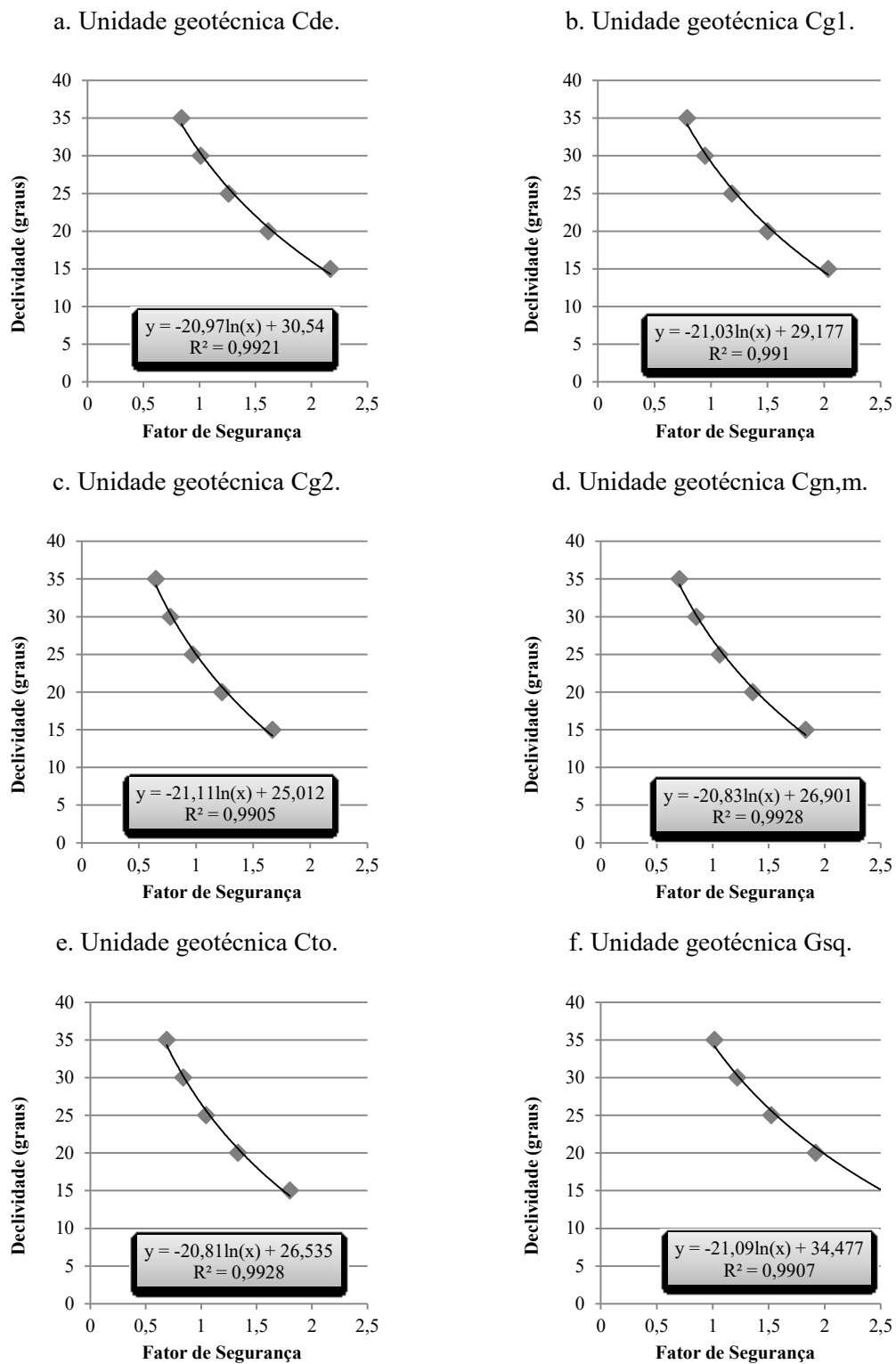
Fonte: Autora

5.2 MAPA DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS ROTACIONAIS

O mapa de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais foi elaborado conforme o método de Bishop.

Por meio da simulação realizada no *software* MacStars para taludes com declividades de 15°, 20°, 25°, 30° e 35°, foram elaborados os gráficos apresentados na Figura 35, os quais demonstram a variação do Fator de Segurança das unidades geotécnicas conforma a mudança da declividade das encostas.

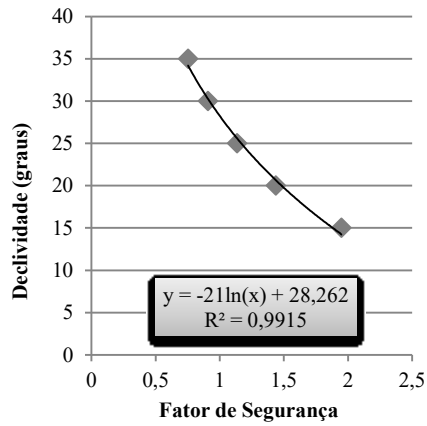
Figura 35 - Variação de FS em função da declividade das encostas das unidades geotécnicas da bacia do rio Forquilhas



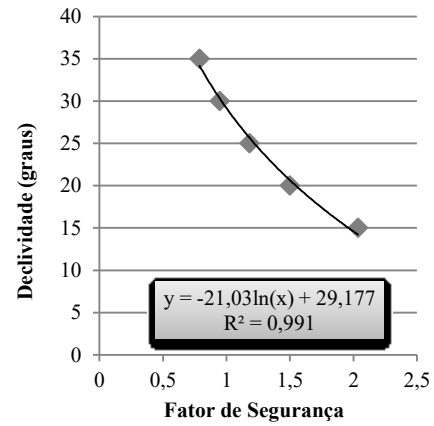
Fonte: Autora

Continuação da Figura 35 - Variação de FS em função da declividade das encostas das unidades geotécnicas da bacia do rio Forquilhas

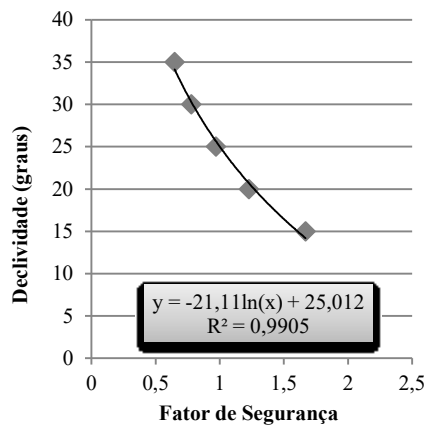
g. Unidade geotécnica PVde.



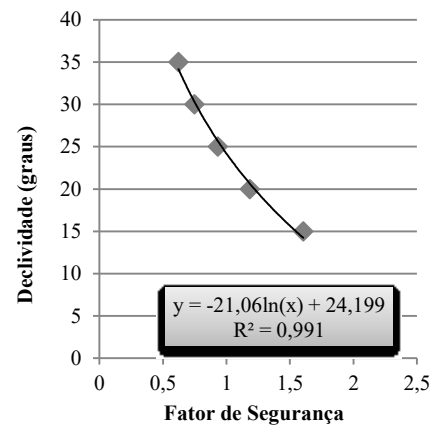
h. Unidade geotécnica PVg1.



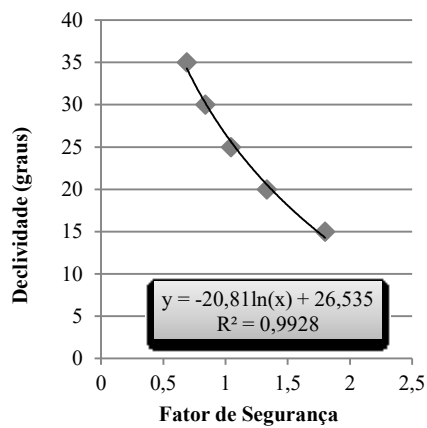
i. Unidade geotécnica PVg2.



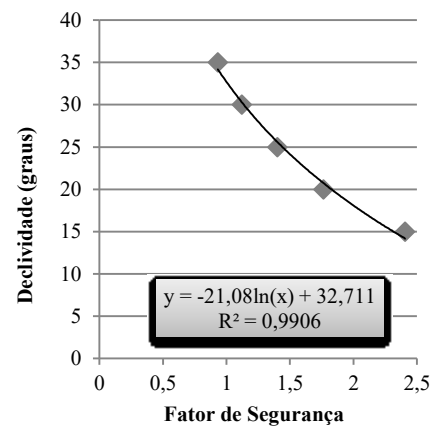
j. Unidade geotécnica PVgn,m.



k. Unidade geotécnica PVto.



l. Aterros



Fonte: Autora

A partir de cada um dos gráficos da Figura 35, foi elaborada a equação de correlação (regressão logarítmica) entre a declividade e o Fator de Segurança correspondente, com o respectivo coeficiente de correlação (R^2) de cada equação. Fazendo-se uso dessas equações, foi possível determinar qual a declividade limite que gera o Fator de Segurança mais baixo admissível e a qual a declividade que gera o Fator de Segurança para regiões seguras para a bacia do Rio Forquilhas, respectivamente $FS = 1,2$ e $FS = 1,4$, conforme a NBR 11.682 (ABNT, 2009).

Dessa forma, pode-se classificar a região da bacia do rio Forquilhas quanto a suscetibilidade a deslizamentos rotacionais conforme o Fator de Segurança das encostas e da declividade. Foram criadas três classes:

- Baixo Risco: áreas de baixa suscetibilidade a deslizamentos rotacionais. São as regiões que apresentam declividade tal que o Fator de Segurança seja superior a 1,4;
- Médio Risco: áreas de média suscetibilidade a deslizamentos rotacionais. São as regiões que apresentam declividade tal que o Fator de Segurança seja inferior a 1,4 e superior a 1,2;
- Alto Risco: áreas de elevada suscetibilidade a deslizamentos rotacionais. São as regiões que apresentam declividade tal que o Fator de Segurança seja inferior a 1,2;

Os valores de declividade das encostas de cada unidade geotécnica que compõe a bacia do rio Forquilhas para cada uma das classes de suscetibilidade são apresentados no Quadro 14.

Quadro 7 - Declividade das encostas das unidades geotécnicas para cada classe de suscetibilidade

Unidade Geotécnica	Baixo Risco FS > 1,4	Médio Risco 1,4 > FS > 1,2	Alto Risco FS < 1,2
Aterro	$\theta < 25,6^\circ$	$25,6^\circ < \theta < 28,9^\circ$	$\theta > 28,9^\circ$
Cde	$\theta < 23,5^\circ$	$23,5^\circ < \theta < 26,7^\circ$	$\theta > 26,7^\circ$
Cg1	$\theta < 22,1^\circ$	$22,1^\circ < \theta < 25,3^\circ$	$\theta > 25,3^\circ$
Cg2	$\theta < 17,9^\circ$	$17,9^\circ < \theta < 21,2^\circ$	$\theta > 21,2^\circ$
Cgn,m	$\theta < 19,9^\circ$	$19,9^\circ < \theta < 23,1^\circ$	$\theta > 23,1^\circ$
Cto	$\theta < 19,5^\circ$	$19,5^\circ < \theta < 22,7^\circ$	$\theta > 22,7^\circ$
Gsq	$\theta < 27,4^\circ$	$27,4^\circ < \theta < 30,6^\circ$	$\theta > 30,6^\circ$
PVde	$\theta < 21,2^\circ$	$21,2^\circ < \theta < 24,4^\circ$	$\theta > 24,4^\circ$
PVg1	$\theta < 22,1^\circ$	$22,1^\circ < \theta < 25,3^\circ$	$\theta > 25,3^\circ$
PVg2	$\theta < 17,9^\circ$	$17,9^\circ < \theta < 21,2^\circ$	$\theta > 21,2^\circ$
PVgn,m	$\theta < 17,1^\circ$	$17,1^\circ < \theta < 20,4^\circ$	$\theta > 20,4^\circ$
PVto	$\theta < 19,5^\circ$	$19,5^\circ < \theta < 22,7^\circ$	$\theta > 22,7^\circ$

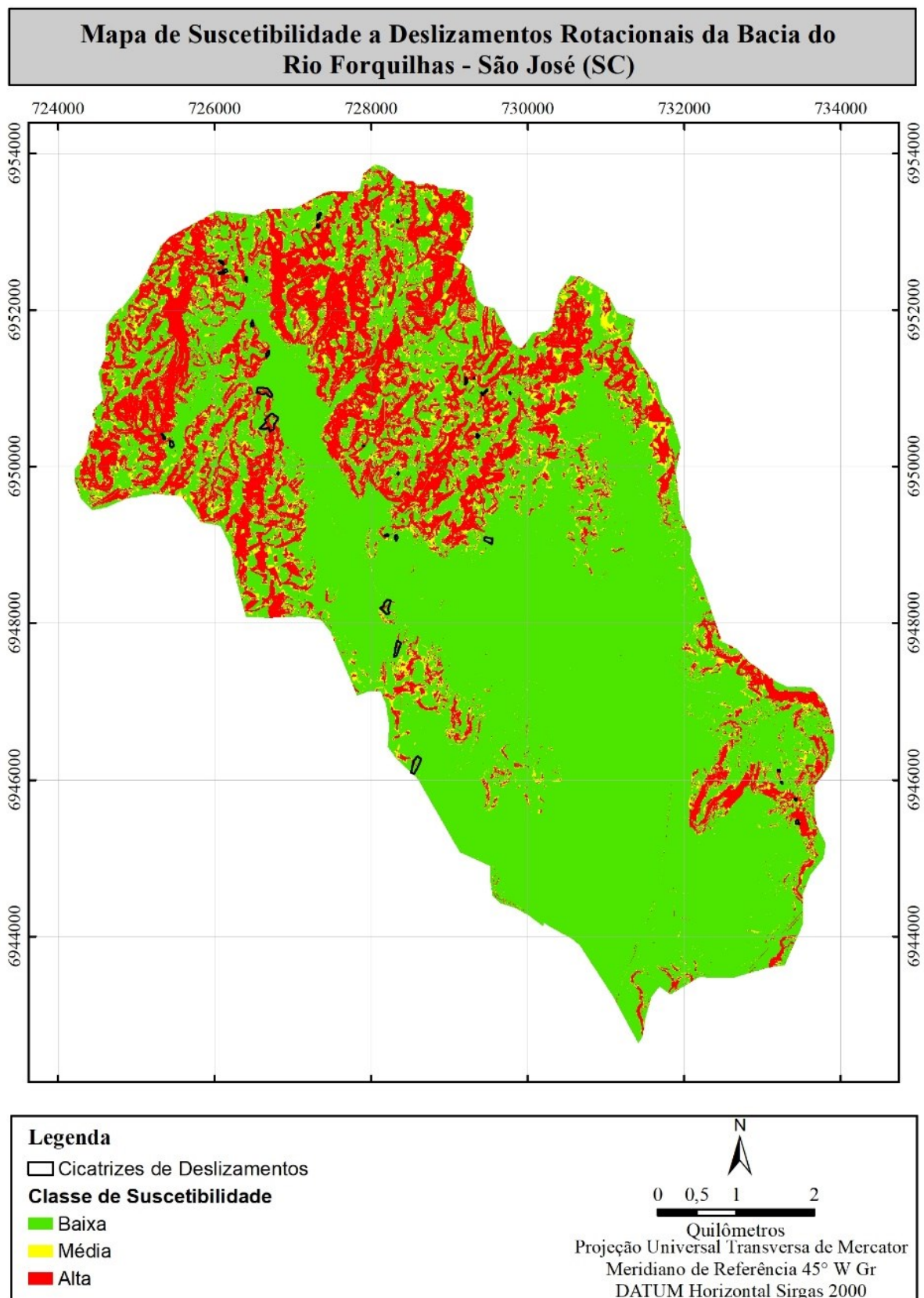
Fonte: Autora

O menor valor de declividade limite para tornar a encosta instável ocorreu na unidade PVgn,m, ou seja, em encostas com declividade superior a $20,4^\circ$ há a possibilidade de ocorrer movimentos de massa. O maior valor de declividade para a encosta ser considerada instável ocorreu na unidade Cde, ou seja, até $26,7^\circ$.

Com isso, foi gerado o mapa de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais da bacia do rio Forquilhas, o qual é apresentado na Figura 36. O mapa é representado utilizando-se o padrão semafórico de cores com o intuito de facilitar sua compreensão. As áreas em verde indicam regiões de baixa suscetibilidade, as áreas em amarelo indicam áreas de média suscetibilidade e, por fim, as áreas em vermelho indicam as regiões de elevada suscetibilidade. O mapa da Figura 36 consiste no mapa de declividades da bacia do rio Forquilhas reclassificado para os ângulos de declividade apresentados no Quadro 14.

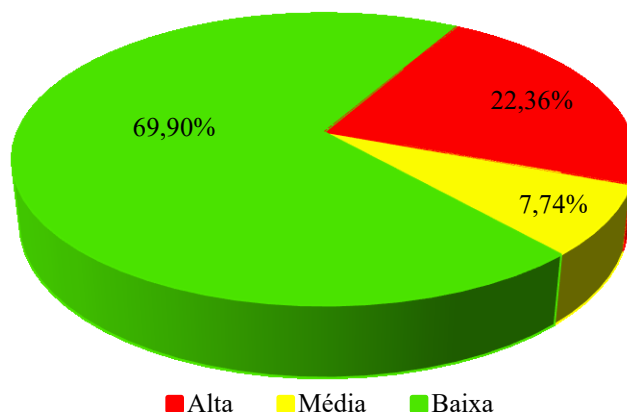
A distribuição espacial das classes de estabilidade da bacia do rio Forquilhas é apresentada no gráfico da Figura 37. Percebe-se a predominância de áreas estáveis, com aproximadamente 70%. Os outros 30% da área da bacia apresentam algum grau de instabilidade, sendo que aproximadamente 22% da área apresenta elevada suscetibilidade a deslizamentos rotacionais.

Figura 36 - Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais da bacia do rio Forquilhas (padrão semafórico)



Fonte: Autora

Figura 37 - Distribuição espacial das classes de estabilidade



Fonte: Autora

Todas as unidades geotécnicas formadas por solos residuais e com encostas em sua área apresentaram áreas instáveis de acordo com o modelo de Bishop. Dentre elas, destacam-se a unidade Cambissolo de substrato granito São Pedro de Alcântara, Cambissolo de substrato granito Alto da Varginha, Cambissolo de substrato gnaiss e migmatito, Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granito São Pedro de Alcântara, Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granito Alto da Varginha e Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato gnaiss e migmatito. Estas unidades apresentam elevadas declividades quando comparadas aos limites das faixas apresentados no Quadro 14.

Por outro lado, a unidade geotécnica Gleissolo de substrato sedimentos quaternários apresentou o maior contingente de áreas estáveis. Esse comportamento era esperado, pois a unidade situa-se nas classes de relevo mais planas (menores declividades).

5.3 MAPA DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS

Sabendo-se que os movimentos de massa que ocorrem não são apenas de um tipo, foi elaborado o mapa de suscetibilidade a deslizamentos (translacionais rasos e rotacionais). O mapa foi criado a partir da união do mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos desenvolvido conforme o modelo SHALSTAB com a reclassificação pelo padrão semafórico, com o mapa de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais, desenvolvido conforme o método de Bishop.

Para a classificação das áreas quanto a suscetibilidade a deslizamentos foi obedecida a hierarquia de grau de risco, conforme exemplificado no Quadro 15.

Quadro 8 - Hierarquia utilizada na definição da classe de suscetibilidade

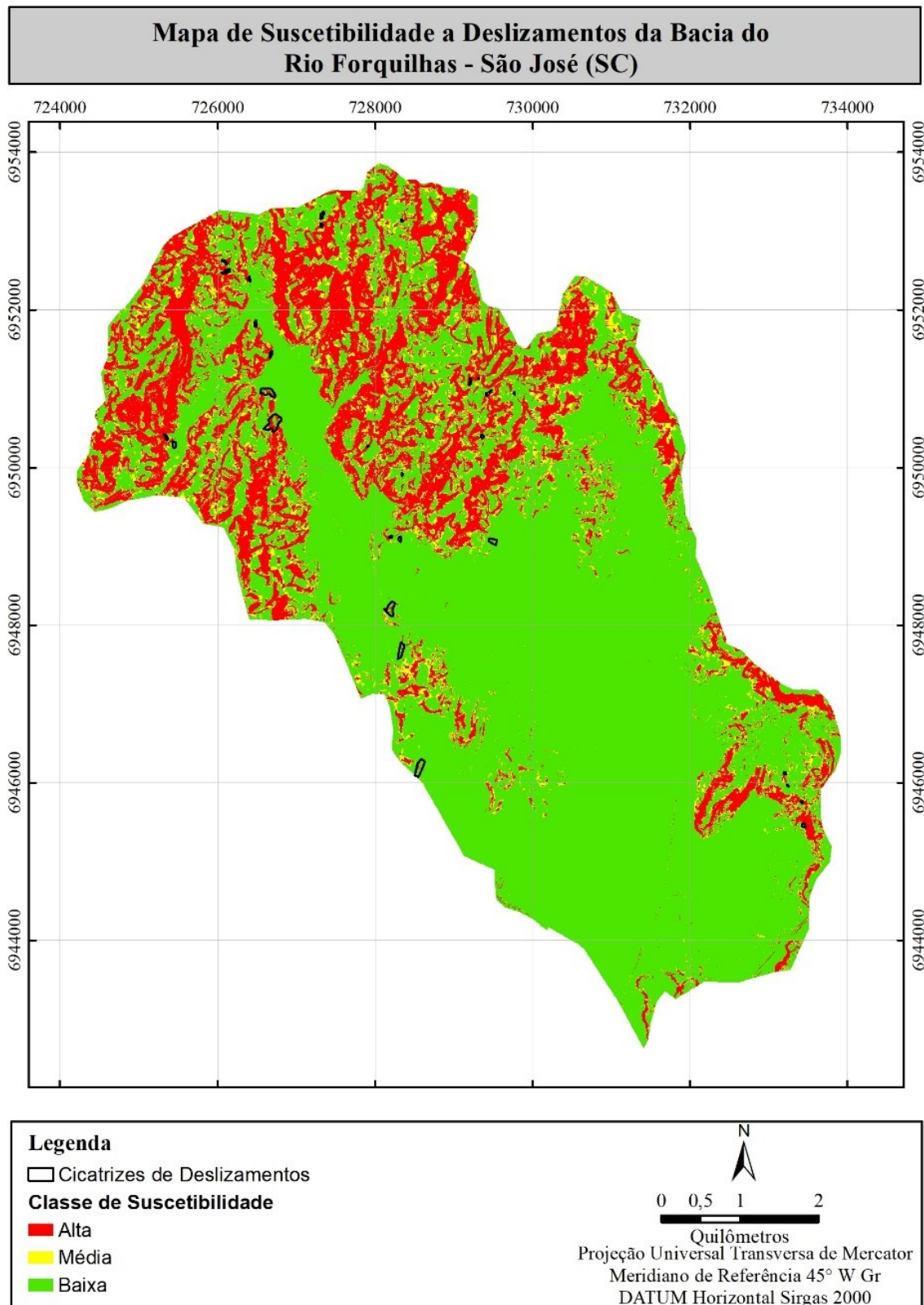
Grau de Suscetibilidade a Deslizamentos Translacionais rasos	Grau de Suscetibilidade a Deslizamentos Rotacionais	Resultado da União dos Mapas
Baixo	Baixo	Baixo
Médio	Médio	Médio
Alto	Alto	Alto
Baixo	Médio	Médio
Baixo	Alto	Alto
Médio	Baixo	Médio
Médio	Alto	Alto
Alto	Baixo	Alto
Alto	Médio	Alto

Fonte: Autora.

Dessa forma, o mapa resultante da união é apresentado na Figura 38, o qual é dividido em três classes de suscetibilidade (baixa, média e alta). O padrão de representação adotado para este mapa foi o semaforico, tal qual utilizado nos demais mapas de suscetibilidade gerados nesta pesquisa.

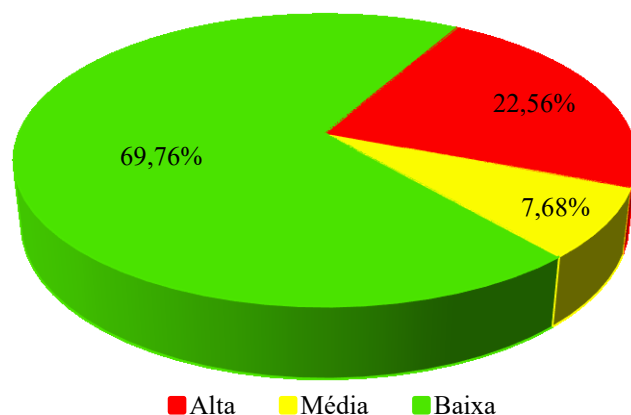
Conforme pode-se observar na Figura 38, há o predomínio das áreas de baixa suscetibilidade. As áreas instáveis estão concentradas na região noroeste da bacia do rio Forquilhas, região onde estão localizadas as encostas e superfícies de maiores declividades. De acordo com a Figura 39, 70% da bacia do rio Forquilhas está localizada em área de baixa suscetibilidade, enquanto que apenas 30% da área encontra-se em áreas instáveis.

Figura 38 - Mapa de suscetibilidade a deslizamentos da bacia do rio Forquilhas (padrão semafórico)



Fonte: Autora

Figura 39 – Distribuição espacial das classes de estabilidade



Fonte: Autora

Tal como esperado e observado nos mapas da Figura 33 e Figura 36, as unidades geotécnicas que apresentaram a maior parcela das áreas classificadas como instáveis são as mesmas que do mapa de suscetibilidade gerado segundo o modelo de Bishop, uma vez que este mapa foi utilizado na elaboração do mapa da Figura 38.

5.4 AFERIÇÃO DOS MAPAS DE SUSCETIBILIDADE

Por meio da análise das imagens de satélite da bacia do rio Forquilhas, foram identificadas e mapeadas 31 cicatrizes de deslizamentos que ocorreram na região. As cicatrizes estão apresentadas juntamente com os mapas de suscetibilidade apresentados neste capítulo (Figura 31, Figura 33, Figura 35 e Figura 38)

A distribuição das cicatrizes de deslizamentos no mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos gerado a partir do modelo SHALSTAB é mostrada no Quadro 16.

Quadro 9 - Distribuição das cicatrizes de deslizamentos no mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos

Classe de Instabilidade	Cicatrizes	Percentual
Alta	12	38,71%
Média	8	25,81%
Baixa	11	35,48%
Total:	31	100%

Fonte: Autora.

Como pode-se observar, aproximadamente 65% das cicatrizes encontram-se em áreas que apresentam risco de deslizamentos (classes de instabilidade média e alta), percentual este bastante significativo.

Para o mapa de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais, o Quadro 17 mostra a distribuição das cicatrizes dentre as classes de instabilidade.

Quadro 10 - Distribuição das cicatrizes de deslizamentos no mapa de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais

Classe de Instabilidade	Cicatrizes	Percentual
Alta	25	80,65%
Média	1	3,23%
Baixa	5	16,13%
Total:	31	100%

Fonte: Autora.

Por fim, a sobreposição das cicatrizes no mapa resultante da união dos mapas de suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos e rotacionais mostra que, de acordo com o Quadro 18, 83,87% das cicatrizes encontram-se em áreas que apresentam suscetibilidade a deslizamentos (classes de instabilidade média e alta), percentual bastante significativo e que demonstra que os mapas gerados nesta pesquisa se aproximam da realidade que acontece na bacia do rio Forquilha.

Quadro 11 - Distribuição das cicatrizes de deslizamentos no mapa de suscetibilidade a deslizamentos (translacionais rasos e rotacionais)

Classe de Instabilidade	Cicatrizes	Percentual
Alta	25	80,65%
Média	1	3,23%
Baixa	5	16,13%
Total:	31	100%

Fonte: Autora.

6 CONCLUSÕES

A utilização de um *software* de geoprocessamento se mostrou imprescindível para a elaboração deste trabalho, uma vez que foi possível gerar, editar e integrar mapas afim de obter os resultados almejados. O algoritmo criado por Michel (2013), para a implementação do modelo SHALSTAB no *software* ArcMap, bem como a aplicação da ferramenta ASA para o processamento do modelo se mostraram de fácil execução, gerando resultados confiáveis para a ocorrência de deslizamentos translacionais rasos no cenário analisado.

O mapa de suscetibilidade da bacia do rio Forquilhas gerado a partir do modelo SHALSTAB teve como profundidade de ruptura adotada 5 metros, caracterizando deslizamentos translacionais rasos. Após a reapresentação do mapa para o padrão de cores semafórico (Figura 34), percebe-se que 89,11% da área de estudo encontra-se em área de baixa suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos, 6,66% da área de estudo está em local de média suscetibilidade e 4,24% da bacia do rio Forquilhas apresenta alta suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos.

As áreas mais suscetíveis estão dentro das unidades geotécnicas Cambissolo de substrato granito São Pedro de Alcântara, Cambissolo de substrato granito Alto da Varginha e Cambissolo de substrato gnaiss e migmatito. Tais unidades possuem maiores declividades, o que corrobora com o resultado alcançado.

As áreas com baixa suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos encontram-se na unidade geotécnica Gleissolo de substrato sedimentos quaternários, onde localizam-se as áreas de relevo planas, com baixa declividade. Estas áreas estáveis são as mais urbanizadas da bacia do rio Forquilhas, porém são áreas alagáveis, gerando outras preocupações sociais de caráter geotécnico não contemplados nesta pesquisa.

A aferição das cicatrizes mapeadas com o mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos mostra uma distribuição das cicatrizes de forma quase igualitária entre as classes de estabilidade baixa, média e alta. A ocorrência de um percentual significativo das cicatrizes em áreas de baixa suscetibilidade pode ser explicada pelo fato de que elas podem ser referentes a outros tipos de movimentos de massa que não translacionais rasos, como os deslizamentos rotacionais, por exemplo, ou ainda terem sido induzidos pela ação antrópica.

O mapa de suscetibilidade da bacia do rio Forquilhas, gerado a partir do método de Bishop, caracteriza os deslizamentos rotacionais. Este mapa foi elaborado utilizando um *software* de estabilidade de encostas, considerando superfícies de ruptura circulares em encostas

com declividade de 15°, 20°, 25°, 30° e 35°. Considerou-se o nível baixo de segurança contra danos materiais e ambientais e três níveis de segurança contra perdas de vidas humanas, levando em conta a provável expansão urbana que ocorrerá na região em função das obras de infraestrutura executadas na bacia, como o contorno viário da BR 101.

O mapa elaborado por meio do método de Bishop indicou que 69,90% da área de estudo encontra-se em área de baixa suscetibilidade a deslizamentos rotacionais, 7,74% da área de estudo está em local de média suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos rotacionais, e 23,36% da bacia do rio Forquilhas apresenta alta suscetibilidade a deslizamentos rotacionais.

O menor valor de declividade limite para tornar a encosta instável ocorreu com declividade superior a 20,4°, na unidade PVgn,m - Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato gnaiss e migmatito.

O maior valor de declividade para a encosta ser considerada instável ocorreu na unidade Cde - Cambissolo de substrato depósito de encostas, ou seja, até 26,7°.

Todas as unidades geotécnicas formadas por solos residuais e com encostas em sua área apresentaram áreas instáveis de acordo com o método de Bishop. As unidades são Cambissolo de substrato granito São Pedro de Alcântara, Cambissolo de substrato granito Alto da Varginha, Cambissolo de substrato gnaiss e migmatito, Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granito São Pedro de Alcântara, Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granito Alto da Varginha e Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato gnaiss e migmatito. Os perfis de solo dessas áreas são mais espessos, propiciando o tipo de movimento rotacional.

Por outro lado, a unidade geotécnica Gleissolo de substrato sedimentos quaternários apresentou o maior contingente de áreas estáveis. Assim como no mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos, esse comportamento era esperado no mapa de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais, pois a unidade situa-se nas classes de relevo mais planas (menores declividades).

A aferição das cicatrizes mapeadas com o mapa de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais mostra 83,87% das cicatrizes encontram-se em áreas que apresentam alta suscetibilidade a deslizamentos, percentual muito relevante e que demonstra que os mapas gerados nesta pesquisa se aproximam da realidade que acontece na bacia do rio Forquilhas.

A partir da união dos mapas anteriormente citados foi elaborado o mapa de suscetibilidade a deslizamentos (translacionais rasos e rotacionais), com padrão de representação semafórico para as três classes de suscetibilidade (baixa, média e alta). Cerca de 69,79% da bacia do rio Forquilhas está localizada em área de baixa suscetibilidade, enquanto que 30,24% da área de estudo encontram-se em áreas instáveis. As áreas instáveis estão concentradas na região

noroeste da bacia do rio Forquilhas, região onde estão localizadas as encostas e superfícies de maiores declividades, pouco urbanizada. Como já dito anteriormente nos mapas de suscetibilidade individuais de deslizamentos translacionais rasos e rotacionais, as áreas estáveis estão localizadas em relevo baixo e plano, nas áreas de maior urbanização da bacia do rio Forquilhas.

A sobreposição das cicatrizes no mapa resultante da bacia do rio Forquilhas resultou em 83,87% das cicatrizes mapeadas encontram-se dentro de áreas que apresentam suscetibilidade a deslizamentos, percentual bastante significativo. Do total, 80,65% está em área de alta classe de instabilidade, 3,23% em área de média classe de instabilidade e 16,13% em área de baixa instabilidade. As cicatrizes em áreas de baixa instabilidade podem ser resultado de outros tipos de movimento de massa não considerados nesta pesquisa, ou ainda ser resultado da ação antrópica direta nas encostas. Estes indícios indicam que deve ser feita uma análise local dos deslizamentos.

Portanto, os mapas gerados nesta pesquisa podem auxiliar no direcionamento da expansão urbana dos bairros presentes na bacia do rio Forquilhas, de forma que áreas classificadas como de alta suscetibilidade tenham sua ocupação evitada e áreas que apresentam média suscetibilidade deverão apresentar restrições na ocupação. As áreas com baixa suscetibilidade deverão ser priorizadas no processo de expansão, salvo outras condicionantes que devem ser analisadas em conjunto neste processo.

Ressalta-se que, na medida em que a urbanização da bacia do rio Forquilhas for se expandindo, alterações nos mapas de suscetibilidades serão geradas devido às alterações na superfície dos terrenos e encostas provocadas pela ação antrópica.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de complementar esta pesquisa, são listadas as seguintes sugestões:

- Levantar, *in loco*, as cicatrizes de deslizamentos, bem como identificar a natureza destas (tipo de movimento de massa);
- Verificar, *in loco*, as cicatrizes de deslizamentos mapeadas com auxílio de imagens de satélites e que estão localizadas nas áreas de baixa suscetibilidade com o intuito de verificar se estas cicatrizes realmente se tratam de deslizamentos;
- Criar uma parceria com a Defesa Civil do município de São José para a retroalimentação da localização das cicatrizes de deslizamentos da bacia do rio Forquilhas;

- Realizar simulações de mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos nos quais são variados os parâmetros de entrada da ferramenta ASA, como a profundidade de ruptura da camada de solo nos deslizamentos translacionais rasos (1m, 2m, 3m, 4m);
- Realizar simulações no mapa de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais em que se varia a cota do nível d'água no perfil da encosta no *software* Macstars a fim de identificar a influência deste parâmetro na determinação do Fator de Segurança da encosta;
- Executar novos ensaios para a caracterização dos solos das diversas unidades geotécnicas que compõem a bacia do rio Forquilhas, bem como a execução de ensaios de resistência para a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo (ângulo de atrito interno e intercepto coesivo);
- Executar ensaios para a determinação da intensidade pluviométrica necessária para diminuir a resistência do solo das diversas unidades geotécnicas a ponto de torná-lo suscetível a deslizamentos;
- Ampliar a abrangência desta pesquisa para todo o território do município de São José, visto as elevadas taxas de crescimento da urbanização.

REFERÊNCIAS

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682:** Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009. 33p.
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. **A physically based, variable contributing area model of basin hydrology.** Bulletin of Hydrological Sciences, v. 24, n.1, p. 43-69, 1979.
- BISHOP, A. W. **The Use of Slip Circle in the Stability Analysis of Earth Slopes,** Geotechnique, v. 5, n. 1, p. 7-17, 1955.
- BORTOLOTTI, F. D. **ArcGIS Aplicado a Bacias Hidrográficas.** Laboratório de Topografia e Cartografia – LTC. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 97 slides. Disponível em: <www.ltc.ufes.br/gisbasins/Aula_06.pdf>. Acesso em: 03 de maio de 2018. Apresentação em PowerPoint.
- BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa Civil. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. **Anuário brasileiro de desastres naturais: 2012.** Brasília, CENAD, 2012. 84 p.
- CEPED UFSC. Centro Universitário de Pesquisa e Estudo sobre Desastres. Universidade Federal de Santa Catarina. **Capacitação básica em Defesa Civil.** 5 ed. Florianópolis: CEPED UFSC, 2014. Disponível em: <http://www.ceped.ufsc.br/wp-content/uploads/2013/01/Livro_DefesaCivil_5ed-Diagramado-Completo-online.pdf>. Acesso em: 24 de abril de 2018.
- CARDOZO, F. S. **Análise das Áreas Suscetíveis A Inundações e Escorregamentos na Bacia do Rio Forquilha, São José/SC.** 2009. 226 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Florianópolis, 2009.
- CARVALHO, P.R.S.; GUIMARÃES, R.F. e CARVALHO JÚNIOR, O.A. Análise comparativa de métodos para delimitação automática das sub-bacias do alto curso do Rio Preto. **Espaço & Geografia**, Brasília, Vol.13, n.2, p.227-307, 2010.
- DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica.** Tradução da 7. ed. americana. São Paulo: Cengage Learning, 2013.
- DIAS, R. D. **Proposta de metodologia de definição de carta geotécnica básica em regiões tropicais e subtropicais.** Revista do Instituto Geológico, v. 16, n. esp, p. 51-55, São Paulo, 1995.
- EPAGRI. Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina. **Mapas Digitais de Santa Catarina.** Disponível em: <<http://ciram.epagri.sc.gov.br/mapoteca/>>. Acesso em: 3 de maio de 2018.
- FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Organizadores). **Geomorfologia e meio ambiente.** 3 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011. p. 123-194.

FERREIRA, R. C. S. **Bacia do Rio Maruim: Transformações e Impactos Ambientais**. 1994. 153 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Florianópolis, 1994.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 192 p.

GT-CADASTRO/FEESC/UFSC. **Leitura da Cidade de São José, SC (Tendências e Potenciais)**. Florianópolis, 2004, 337 p, mapas (92) – Projeto de Revisão do Plano Diretor de São José – SC.

GUESSER, L. H. **Mapeamento geotécnico da área urbana do município de Antônio Carlos (SC) aplicado ao planejamento do uso e ocupação de solos**. 2016. 228 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2016.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 1984. 196 p.

GUIMARÃES, R. F. **Utilização de um modelo de previsão de áreas susceptíveis a escorregamentos rasos com controle topográfico: adequação e calibração em duas bacias de drenagem**. 2000. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2000.

GUIMARÃES, R.F. *et al*, C.P. Movimentos de massa. In: FLORENZANO, Teresa Gallotti (Organizador.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. p. 159-184.

HERRMANN, M. L. de P.; CARDOZO, F. S. **As Inundações no Município de São José -SC e suas consequências nos bairros Flor de Nápolis, Jardim Pinheiros e Forquilha na bacia do Rio Forquilha**. In: VII Simpósio nacional de Geomorfologia e II Encontro latino Americano de Geomorfologia, 2008, Belo Horizonte. Dinâmica e Diversidade de Paisagens. Belo Horizonte- MG: Instituto de Geociências, 2008. p. 1-10.

HIGASHI, R.A.R. **Metodologia de Uso e Ocupação dos Solos de Cidades Costeiras Brasileiras Através de SIG com Base no Comportamento Geotécnico e Ambiental**. Florianópolis, 2006. 486 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

HIGASHI, R. A. R.; DIAS, R. D.; MACCARINI, M. **On the Erosive Potential of Some Weathered Soils from Southern Brazil**. Soils and Rocks, São Paulo, 34 (3). p. 219-225, 2012.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estatísticas**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/por-cidade-estado-estatisticas.html?t=destaques&c=4216602>>. Acesso em: 28 de maio de 2018.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Geomorfologia**. 2 ed. Rio de Janeiro. 2009. Disponível em:

<<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv66620.pdf>>. Acesso em: 28 de maio de 2018.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. **Projeto Gerenciamento Costeiro (GERCO)**. 1995 e 2003.

LAMGEO. Laboratório de Mapeamento Geotécnico. Mapeamento geotécnico da área de expansão urbana do município de São José. **Relatório**. Florianópolis, 2015. Relatório digital.

MASSAD, F. **Obras de Terra: curso básico de Geotecnia**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 216 p.

MICHEL, G. P. **Modelagem de estabilidade de encostas com consideração do efeito da vegetação**. 2013. 152 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/107096>>. Acesso em: 13 de maio de 2018.

MICHEL, G. P.; KOBAYAMA, M.; GOERL, R. F. **Análise comparativa entre os modelos SHALSTAB e SINMAP na identificação de áreas susceptíveis a escorregamentos translacionais**. In: X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos (2012: Foz do Iguaçu) Foz do Iguaçu: ENES, Anais, 21 p., 2012. Disponível em: <<http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/ENES161.pdf>>. Acesso em: 13 de maio de 2018.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. **A physically based model for the topographic control on shallow landsliding**. Water Resources Research, v. 30, p. 1153-1171, 1994.

O'LOUGHLIN, E. M. **Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topo-graphic analysis**. Water Resources Research, v. 22, p. 794-804, 1986.

PANDOLFO, C.; BRAGA, H. J.; SILVA JR, V. P. da; MASSIGNAM, A. M., PEREIRA, E. S.; THOMÉ, V. M. R.; VALCI, F.V. **Atlas climatológico do Estado de Santa Catarina**. Florianópolis: Epagri, 2002. CD-Rom.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO JOSÉ. Disponível em: <<http://www.saojose.sc.gov.br/index.php/turista/visite-sao-jose>>. Acesso em: 28 maio 2018.

ROSOLEM, G. P. N. **Mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos rasos na bacia do rio Forquilhas – São José-SC**. 2014. 164 p. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2014.

SANETAL Engenharia e Consultoria. **Plano de Saneamento Básico para a Área de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais do Município de São José**. Prefeitura Municipal de São José. São José, 2013. 194 p.

SANTOS, Glaci Inez Trevisan. **Integração de informações pedológicas, geológicas e geotécnicas aplicadas ao uso do solo urbano em obras de engenharia**. 1997. xi, 209f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia.

SBROGLIA, R. M. **Mapeamento geotécnico e das áreas suscetíveis a deslizamentos na microbacia do Ribeirão Baú, Ilhota/SC**. 2015. 187 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Florianópolis, 2015.

SBROGLIA, R. M.; PORATH, P. H. M.; HIGASHI, R. A. R.; OLIVEIRA, F. H. de. Mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais com o uso da ferramenta ASA – *Automatic Shalstab Analysis*. In: XII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, 12ª edição, 2017, Florianópolis. **Anais...** São Paulo: ANMS, 2017.

SOUZA, C. R. G. *et al.* In: TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J; AMARAL, R. (Organizadores). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. 196 p.

TARBOTON, D. G. Terrain analysis using digital elevation models in hydrology. In: 23rd ESRI International Users Conference, San Diego, California, 7-11 de Julho 2003. **Proceedings...**

TONUS, B. P. A. **Estabilidade de taludes: avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da Serra do Mar paranaense**. 2009. 147 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Curitiba, 2009.